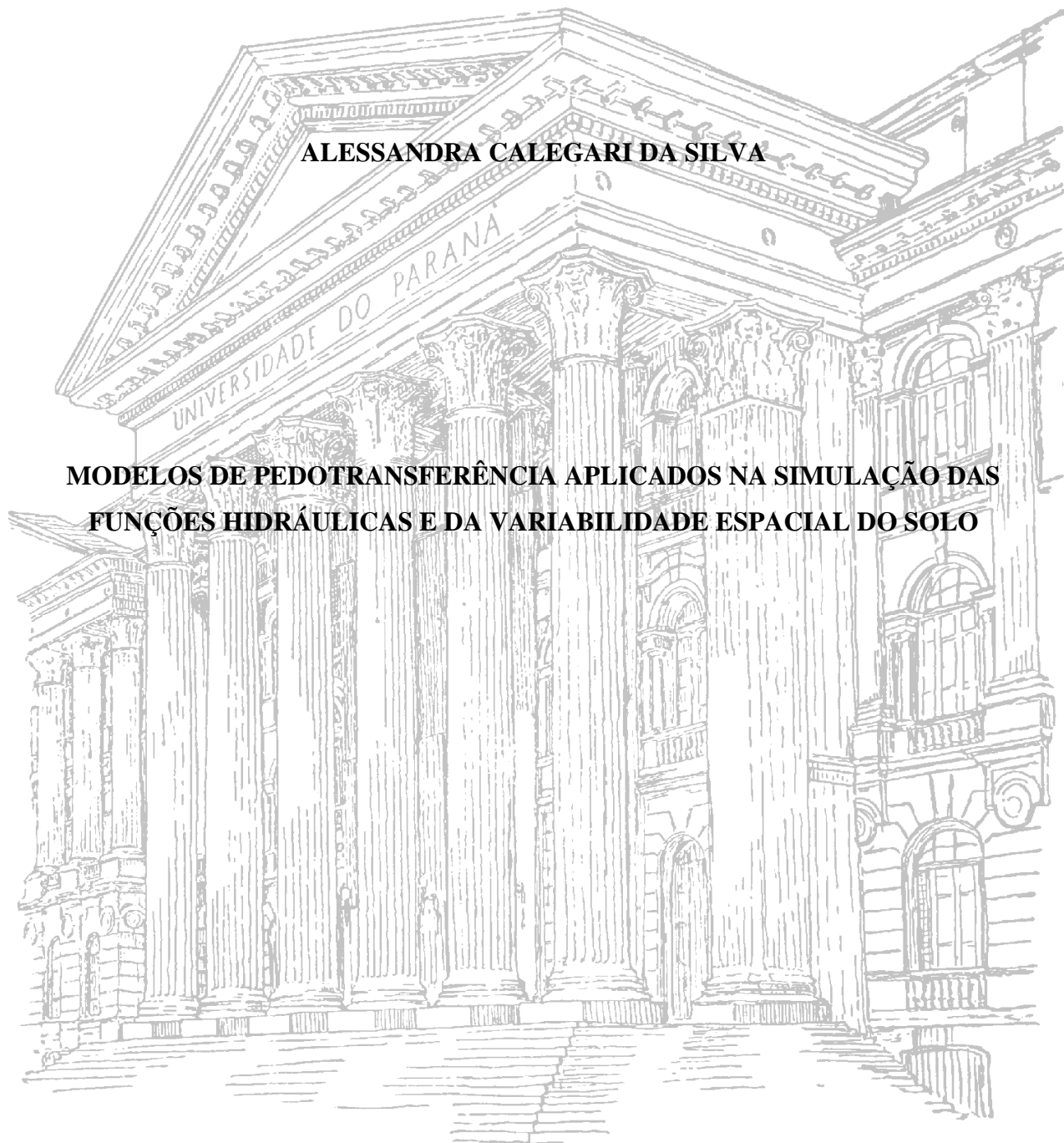


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

ALESSANDRA CALEGARI DA SILVA

**MODELOS DE PEDOTRANSFERÊNCIA APLICADOS NA SIMULAÇÃO DAS
FUNÇÕES HIDRÁULICAS E DA VARIABILIDADE ESPACIAL DO SOLO**



CURITIBA

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

ALESSANDRA CALEGARI DA SILVA

**MODELOS DE PEDOTRANSFERÊNCIA APLICADOS NA SIMULAÇÃO DAS
FUNÇÕES HIDRÁULICAS E DA VARIABILIDADE ESPACIAL DO SOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. D.Sc. Robson André Armino

Co-Orientador: Prof. D.Sc. Alexsandro dos S. Brito

Co-Orientadora: Prof^a. D.Sc. Karina M.C. Polizeli

CURITIBA

2015

S586 Silva, Alessandra Calegari da.
Modelos de pedotransferência aplicados na simulação das
funções hidráulicas e da variabilidade espacial do solo. Alessandra
Calegari da Silva. – Curitiba : 2015.
ix, 149 f. il.

Orientador: Robson André Armindo.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.
Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo.

1. Hidrologia agrícola. 2. Solos - Umidade. I. Armindo, Robson
André. II. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências
Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.
III. Título.

CDU 631.432



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
Mestrado e Doutorado



PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **ALESSANDRA CALEGARI DA SILVA**, intitulada: “**Modelos de pedotransferência aplicados na simulação das funções hidráulicas e da variabilidade espacial do solo**”, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição do candidato, emitem parecer pela “**APROVAÇÃO**” da referida Dissertação. O candidato atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 10 de julho de 2015.

Prof. Dr. Robson André Armindo, Presidente

Prof. Dr. Luiz Fernando Pires, Iº. Examinador

Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, IIº. Examinador

Prof. Dr. Irani dos Santos, IIIº. Examinador

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Maria Helena Calegari da Silva e António Orives da Silva (in memorian), minhas irmãs, Andréia, Claudinéia, e as minhas sobrinhas Gabrieli, Geovanna e Melodi, maiores incentivadores da minha caminhada.

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus por ter me concedido sabedoria, discernimento, disposição e saúde para que eu pudesse chegar até aqui e enfrentar as barreiras encontrada durante este percurso.
- À minha família: minha mãe Maria Helena Calegari da Silva pelo apoio e por sempre estar ao meu lado, me incentivando e ajudando nas minhas decisões. Ao meu pai António Orives da Silva, durante o pouco tempo que estive ao meu lado, mostrou-me a importância do respeito, amor e principalmente a honestidade, sei que não posso te ver, mas te sinto em cada momento da minha vida. Às minhas irmãs Andréia e Claudinéia Calegari da Silva, pelo incentivo em todos os momentos de estudo, e minhas sobrinhas Gabrieli Calegari Silva, Geovanna e Melodi Calegari Rubio, obrigada por tudo, amo vocês minhas pequenas.
- Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade em cursar o mestrado e realizar este trabalho.
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Robson André Armindo, pela amizade, sugestões e críticas para o bom andamento desta pesquisa. Por seus valiosos ensinamentos e ideias que me inspiraram a fazer o melhor e a continuar a caminhada em busca do “por que”.
- Ao meus co-orientadores, Prof. Dr. Alessandro dos Santos Brito, por ceder os dados para a execução desta pesquisa, e sugestões. À Prof^a. Dra. Karina Maria Vieira Cavalieri Polizeli pelas sugestões e críticas.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, sem o qual não seria possível a conclusão do meu mestrado.
- Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, por seus valiosos ensinamentos que nos inspiram a continuar e melhorar em nossos estudos.
- Aos meus colegas e amigos da turma de mestrado 2013, em especial (Priscila Simon, Leocimara Paes, Gabriel Goularte, Stephanie Ferreira, Caio Domingues, Wilian Demetrio e Leticia Gonçalves) que muito colaboraram com palavras e apoio para enfrentar essa etapa em minha vida e conclusão deste trabalho, “o meu muito obrigado”.
- Ao Núcleo de Atividades de Engenharia de Biosistemas (NAEB), em especial (Luiz Sobenko e Aline Huf) demonstrando a importância da pesquisa, ensino e extensão durante a graduação, no qual tem por objetivo formar um forte grupo, futuro PET.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUÇÃO GERAL	1
1. CAPÍTULO I. FUNÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA NA QUANTIFICAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
1.1. Resumo	4
1.2. Abstract	5
1.3. Introdução	6
1.4. Revisão Bibliográfica	7
1.5. Conclusões	30
1.6. Literatura Citada	30
2. CAPÍTULO II. VARIABILIDADE ESPACIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO VERMELHO AMARELO.....	39
2.1. Resumo	39
2.2. Abstract	40
2.3. Introdução	41
2.4. Material e Métodos	43
2.5. Resultados e Discussão	48
2.6. Conclusões	57
2.7. Literatura Citada	57
3. CAPÍTULO III. SIMULAÇÃO DAS FUNÇÕES HIDRÁULICAS DO SOLO POR MEIO DE MODELOS DE PEDOTRANSFERÊNCIA – <i>Splintex</i> e <i>Rosetta</i>	60
3.1. Resumo	60
3.2. Abstract	61
3.3. Introdução	62
3.4. Material e Métodos	63
3.5. Resultados e Discussão	74
3.6. Conclusões	105
3.7. Literatura Citada	106
4. CAPÍTULO IV. DESEMPENHO DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA NA SIMULAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DAS FUNÇÕES HIDRÁULICAS DO SOLO.....	113
4.1. Resumo	113

4.2. Abstract	114
4.3. Introdução	115
4.4. Material e Métodos	117
4.5. Resultados e Discussão	125
4.6. Conclusões	142
4.7. Literatura Citada	142
CONCLUSÃO GERAL	145
CONSIDERAÇÕES FINAIS	146
APÊNDICES	147

MODELOS DE PEDOTRANSFERÊNCIA APLICADOS NA SIMULAÇÃO DAS FUNÇÕES HIDRÁULICAS E DA VARIABILIDADE ESPACIAL DO SOLO¹

Autor: Alessandra Calegari da Silva

Orientador: Prof. D.Sc. Robson André Armindo

Co-orientador: Prof. D.Sc. Alexsandro dos Santos Brito

Co-Orientadora: Prof^a. D.Sc. Karina Maria Vieira Cavalieri Polizeli

RESUMO GERAL

Em busca de compreender os processos dinâmicos na zona insaturada do solo, alternativas de quantificação indireta tornam-se necessárias, como o desenvolvimento de modelos fisicamente fundamentados. Diante do exposto, objetivou-se avaliar o desempenho de dois modelos de função de pedotransferência (FPT) nomeados *Splintex* e *Rosetta* na quantificação dos processos hidráulicos do solo e sua variabilidade espacial. As análises e resultados foram organizados e apresentados em quatro capítulos, sendo: no primeiro capítulo apresentado o estado-da-arte da importância das FPT's na simulação dos processos hidráulicos do solo; no segundo capítulo foi avaliado a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo de uma parcela experimental de solo arenoso, localizado no município de Piracicaba-SP, usando métodos geoestatísticos para análise dos dados; no terceiro capítulo, avaliou-se o desempenho do programa de *Splintex* na determinação dos parâmetros da equação de van Genuchten, para solo com textura arenosa e argilosa; e, também, o desempenho do programa de *Splintex* em comparação com *Rosetta* na obtenção dos parâmetros e funções hidráulicas do solo; no quarto capítulo avaliou-se o desempenho de duas FPT's em base paramétrica, quanto à capacidade de simular a estrutura espacial das propriedades e funções hidráulicas do solo. Concluiu-se que a utilização das FPT's na determinação das propriedades e funções hidráulicas do solo mostrou-se precisa e exata, resultando em alternativa hábil e econômica.

Palavras-chave: Processos hidráulicos do solo, curva de retenção da água no solo, zona vadosa do solo.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (149 p.) Julho, 2015.

PEDOTRANSFER APPLIED MODELS IN SIMULATION OF THE HYDRAULIC FUNCTIONS AND SPATIAL VARIABILITY OF SOIL²

Author: Alessandra Calegari da Silva

Advisor: Prof. D.Sc. Robson André Armindo

Co-Advisor: Prof. D.Sc. Alexsandro dos Santos Brito

Co-Advisor: Prof^a. D.Sca. Karina Maria Vieira Cavalieri Polizeli

GENERAL ABSTRACT

To understand the dynamic processes in the soil vadose zone, indirect quantification alternatives becomes necessary, as the development of models based on physics. This work aimed to evaluate the performance of two pedotransfer function (PTF) models, *Splintex* and *Rosetta*, in the quantification of soil hydraulic processes and its spatial variability. Results are presented in four distinct chapters: the first shows the PTF's importance in the simulation of soil hydraulic process. The second chapter was assessed the spatial variability of soil physical properties in an sandy soil experimental plot, from Piracicaba city - SP, using geostatistical methods for data analysis. The third chapter had as objectives to evaluate the performance of *Splintex* program in determining the van Genuchten equation parameters for sandy and loamy soil, in comparinon with *Rosetta*, in obtaining the parameters of the soil and hydraulic functions. and the last chapter, presented the simulation performance evaluated in two PTF's parametric basis for their ability to simulate the spatial structure and properties of soil hydraulic functions. It was concluded that the use of PTF's to determine the properties and hydraulic soil functions proved to be precise and accurate, resulting in a feasible alternative.

Key-Words: Hydraulic soil processes, soil water retention curve, soil vadose zone.

² Soil Science Master Dissertation. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (149 p.) July, 2015.

INTRODUÇÃO GERAL

O solo é um componente essencial para o ciclo da água, apresentando-se como elemento da paisagem por meio da interação com a planta e a atmosfera, contribuindo para a sustentabilidade e produtividade de ecossistemas naturais e agrícolas, resultando em sistema complexo, dinâmico e heterogêneo.

Devido a importância do solo no ciclo da água, cientistas veem apresentando estudos voltados para sua sustentabilidade, uma vez que a qualidade do solo pode estar declinando. A Organização das Nações Unidas (ONU) afirma que dentre os dez maiores problemas da humanidade nos próximos 50 anos, quatro estão interligados com a falta de água, alimentos, energia e a destruição do meio ambiente. Esses problemas são resultado da estimativa do aumento da população mundial em 65% entre os anos 1995 e 2050, com maiores crescimentos em países em desenvolvimento.

Com o crescimento da população, a demanda por alimentos aumentará, necessitando de condições ideais para suprir a demanda existente. Isso também está previsto no quarto relatório do *International Panel on Climate Change* (IPCC), que ainda aponta o Brasil como uma das regiões afetadas por mudanças climáticas, com possível agravamento da escassez hídrica. Barros et al. (2013) acrescentam que serão necessários esforços na elaboração de modelos de simulação, capazes de indicar e orientar medidas que viabilizem a otimização da água para auxiliar em políticas de gestão.

Os modelos que simulam processos hidráulicos que ocorrem na zona insaturada do solo são úteis, auxiliando no entendimento da dinâmica da água e seus compostos dissolvidos na matriz do solo. McBratney et al. (2002) relatam que os modelos geralmente requerem grande número de parâmetros para descrever o balanço hídrico, transporte de fluidos ou outras propriedades físicas do solo. Como as propriedades podem ser altamente variáveis espacialmente e temporalmente, suas medições são trabalhosas e onerosas, dificultando processos de modelagem ambiental.

Na tentativa de minimizar as limitações no estudo do comportamento da água na zona insaturada do solo, pesquisadores têm desenvolvidos equações fisicamente fundamentadas, estocásticas ou empíricas. As equações atuam na determinação das propriedades e funções hidráulicas do solo de forma indireta, relacionando características edáficas de difícil determinação com outras facilmente disponíveis. Na Ciência do Solo, essas equações são normalmente chamadas de função de pedotransferência (FPT).

Diversas FPT's vêm sendo utilizadas na ciência do solo, hidrologia e agrometeorologia. Barros et al. (2013) abordam que as FPT's podem auxiliar na simulação do transporte de água, ar e solutos, regimes de temperatura, manejo e compactação, estabilidade da estrutura, resistência à penetração do sistema radicular, química do solo e agricultura de precisão. Wösten et al. (2001) acrescentam que estudos de monitoramento do transporte de produtos químicos nos solos, bem como correlacionados com as mudanças climáticas globais dependem de modelos numéricos que simulam fluxo de calor e água na superfície do solo, descrevendo como água e compostos dissolvidos se movem para dentro e através do solo, sendo as FPT's uma alternativa na determinação dos parâmetros e funções hidráulicas do solo.

O conhecimento da dinâmica da água no solo torna-se um grande aliado para tomadas de decisões nos aspectos que envolvem o ambiente. A busca por modelos de fácil obtenção e fisicamente fundamentados para quantificação dos processos hidráulicos do solo, tornam-se constantes no meio científico. Neste cenário, a FPT é uma alternativa muito útil, que pode ser utilizada para contornar as dificuldades de medições, permitindo o monitoramento em grande escala, auxiliando na tomada de decisão nos processos que envolvem o ambiente solo-planta-atmosfera.

Teve-se como objetivo no presente trabalho avaliar o desempenho de dois modelos de função de pedotransferência (FPT) nomeados *Splintex* e *Rosetta* aplicados na simulação dos processos hidráulicos do solo e da variabilidade espacial desses processos.

As análises e resultados obtidos no presente trabalho foram organizados e apresentados, a seguir, em quatro capítulos:

Capítulo 1 – Função de pedotransferência na quantificação da água no solo - Revisão Bibliográfica;

Capítulo 2 – Variabilidade espacial das propriedades físicas de um latossolo vermelho amarelo;

Capítulo 3 – Simulação das funções hidráulicas do solo por meio de modelos de pedotransferência – *splintex* e *rosetta*;

Capítulo 4 – Desempenho de funções de pedotransferência na simulação da variabilidade espacial das funções hidráulicas do solo.

LITERATURA CITADA

BARROS, A.H.C.; VAN LIER, Q.J.; MAIA, A.H.N. & SCARPARE, F.V. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern brazil. R. Bras. Ci. Solo, 37:379-391, 2013.

IPCC – *International Panel on Climate Change*, 2015. Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Climate Change, Food, and Agriculture. MASTRANDREA, M.D.; MACH, K.J.; BARROS, V.R.; BILIR, T.E.; DOKKEN, D.J.; EDENHOFER, O.; FIELD, C.B.; HIRAISHI, T.; KADNER, S.; KRUG, T.; MINX, J.C.; PICHS-MADRUGA, R.; PLATTNER, G.-K.; QIN, D.; SOKONA, Y.; STOCKER, T.F. & TIGNOR, M. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 68p.

MCBRATNEY, A.B.; MINASNY, B.; CATTLE, S.R. & VERVOORT, R.W. From pedotransfer functions to soil inference systems. Geoderma, 109:41-73, 2002.

ONU – *Organizacao das Nações Unidas*, 2007. HUMANA GLOBAL Associação para a Promoção dos Direitos Humanos, da Cultura e do Desenvolvimento. XAVIER, A.I.; RODRIGUES, A.L.; OLIVEIRA, F.; OLIVEIRA, G.; COELHO, I.; COUTINHO, I. & MATOS, S. Coimbra, Portugal, 438p.

WÖSTEN, J.H.M.; PACHEPSKY, Y.A. & RAWLS, W.J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. J. Hydro., 251:123-150, 2001.

- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -

CAPÍTULO 1: FUNÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA NA QUANTIFICAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

RESUMO

Estudos que envolvem tópicos da dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera tais como disponibilidade de água no solo para as culturas, infiltração, drenagem e movimento de solutos no solo, necessitam do conhecimento do conteúdo de água no solo e dos seus potenciais exercidos na matriz do solo. A relação pode ser descrita pela curva de retenção de água no solo (CRA), quantificadas por modelos matemáticos, como o de van Genuchten, que correlaciona as umidades volumétricas com os respectivos potenciais mátricos que se encontram retidas na matriz do solo. No entanto, sua execução requer tempo e custo elevado, dificultando a quantificação. Uma alternativa para obtenção da CRA é a utilização de ajustes estatísticos dos parâmetros físicos do solo, obtendo-se funções de pedotransferência (FPT's). As FPT's podem ser definidas como a estimativa de propriedades ou funções hidráulicas do solo de difícil obtenção, a partir de propriedades ou atributos físicos do solo de fácil medição. No presente capítulo, tem-se como objeto apresentar o estado-da-arte, bem como a importância e métodos de quantificação da água no solo, dando embasamento para o estudo dos processos físicos que ocorrem nos solos, destacando a importância das FPT's: classe, contínuas, paramétricas e redes neurais na obtenção dos parâmetros da CRA.

Palavras-chave: Otimização da água, hidráulica do solo, curva de retenção da água no solo.

- LITERATURE REVIEW -

CHAPTER 1: PEDOTRANSFER FUNCTION IN WATER MEASUREMENT IN SOIL

ABSTRACT

Studies involving dynamic threads of water in the soil-plant-atmosphere system such as the soil water availability to the crops, infiltration, drainage and solutes movement in soil, require knowledge of the soil water content and their potential exercised on soil matrix. This relationship can be described by the soil water retention curve (SWRC), quantified by mathematical models, such as van Genuchten, correlating the water content with the tension that this is retained in the soil particles. However, its implementation requires time and high costs, making it difficult to quantify. An alternative to obtaining the SWRC is to use statistical fit of soil physical parameters, obtaining Pedotransfer functions (PTF's). PTF's can be defined as the estimative of certain soil properties hard to obtain, from easily measured characteristics. In this chapter, had as objective to present the state of the art, regarding the importance and quantification methods of soil water, giving basis to any conclusions about the physical processes that occur in soils. Highlighting the importance of PTF's class, continuous, parametric and neural networks in getting the SWRC parameters.

Keywords: Water Optimization, soil hydraulic, water retention curve in the soil.

1.3. INTRODUÇÃO

A água é um importante recurso natural que está interligado com todos os aspectos da civilização humana, do desenvolvimento industrial ao agrícola, estando presente nos valores sociais e culturais. De acordo com levantamentos geo-ambientais realizados em 2010 pela Agência Nacional de Águas (ANA), o consumo de água doce no Brasil foi de 69% para fins de irrigação e 31% para os setores industrial, urbano, rural e animal.

A descrição do quarto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) aponta o Brasil como uma das regiões afetadas por mudanças climáticas, com possível elevação da temperatura e agravamento da escassez hídrica que afetaria negativamente o solo e o ambiente. Atualmente pode-se observar a degradação do solo em diversos processos, tais como: perda do solo por erosão hídrica e eólica, contaminação do solo por resíduos urbanos e industriais, dentre outros.

O solo é um componente essencial para o ciclo da água, e compreender a dinâmica da água na zona vadosa do solo, torna-se crucial no meio científico, contribuindo assim para a sustentabilidade do meio ambiente.

A dinâmica da água no solo é um dos temas centrais da Física do Solo, tendo importância relacionada à retenção e disponibilidade da água para as plantas, infiltração e redistribuição e ao transporte de gases, solutos e calor no solo. Auxiliando no entendimento da dinâmica hidráulica no ambiente do sistema solo-planta-atmosfera. Assim, contribuições poderão ser dadas para a conservação do solo e da água, garantindo ou melhorando as atuais produtividade, porém valendo-se de práticas mais sustentáveis que não prejudicariam os processos ambientais existentes.

No entanto, a determinação das propriedades e funções hidráulicas do solo são consideradas caras e difícil obtenção, devido à alta variabilidade espacial e temporal, principalmente em grande escala de monitoramento. Assim, o desenvolvimento de modelos de simulação, capazes de indicar e orientar, ganha destaque auxiliando nas políticas de gestão e de planejamento.

Neste trabalho, teve-se como objetivo ressaltar a importância dos processos de quantificação da água no solo, destacando a importância das Funções de Pedotransferência (FPT's) em base pontual, classe, paramétrica na obtenção das propriedades e funções hidráulicas do solo.

1.4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.4.1. RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

Considera-se o solo como um sistema de variação tridimensional, constituído por partículas sólidas, com tamanhos e formas das mais variadas, entremeadas por espaços vazios denominados por poros, com diversas formas e tamanhos interconectados. Pode-se dizer, portanto, que o solo é composto basicamente pelas frações sólida, líquida e gasosa. A primeira é constituída por matéria mineral e orgânica, a segunda por solução, comumente denominada água no solo, e a última refere-se ao ar do solo, composto por N_2 , O_2 , CO_2 e outros gases nobres (Prevedello & Armindo, 2015).

Normalmente, o espaço poroso do solo é ocupado por quantidades variáveis de fluidos (água e ar). Quando o espaço poroso estiver ocupado parcialmente por água e ar, é dito que o solo encontra-se não saturado. Por outro lado, quando o espaço poroso estiver na sua capacidade máxima de retenção de água, o solo é dito saturado.

Referindo-se a retenção de água na matriz do solo, destacam-se os potenciais totais, van Lier (2010) descreve que o mesmo foi introduzido com o intuito de estabelecer o sentido do movimento e armazenamento da água entre dois pontos na matriz do solo em relação a um potencial padrão. A água padrão é dita quando essa se encontra isenta de sais, submetida a condições normais de pressão relativa igual a zero e sobre a superfície do solo.

Dentre os potenciais totais exercidos na solução do solo destacam-se cinco componentes: térmico, pressão, gravitacional, osmótico e matricial. Como os processos que ocorrem no solo são aproximadamente isotérmicos, a componente térmica geralmente é desprezada. Os outros quatro componentes podem assumir importância considerável ou desprezível, dependendo do sistema-meio avaliado (Reichardt & Timm, 2004).

Em virtude da heterogeneidade dos poros dos solos, com formas e tamanhos variáveis de um solo para outro, a obtenção de equação teórica para a quantificação do potencial mátrico (ψ_m), como no caso do potencial gravitacional e de pressão, torna-se difícil (Libardi, 2012). A dificuldade se deve à grande variação da umidade no solo, sendo que quanto mais seco o solo estiver menor será o potencial.

Dois são os processos que explicam a retenção da água em solo não saturado. Pevedello & Armindo (2015) descrevem que no primeiro deles, a retenção ocorre nos chamados poros capilares do solo, designado pelo fenômeno da capilaridade, estando associado à interface água-ar, ocorrendo em maiores umidades do solo. Já o segundo processo

ocorre quando a umidade do solo é menor, como filmes retidos nas superfícies dos sólidos na matriz do solo, designado pelo fenômeno da adsorção.

A junção dos fenômenos de adsorção e capilaridade entre a água e a matriz do solo constitui o potencial mátrico, o qual pode ser descrito como uma medida do trabalho realizado por um agente externo para tornar livre a água retida num solo não saturado (Libardi, 2012). Ainda segundo o autor, o ψ_m é sempre um valor negativo, sendo comum o uso do termo tensão da água no solo para eliminar o sinal negativo, a não ser no caso particular de uma interface água-ar plana.

Para determinação da relação tensão e umidade, métodos de campo ou métodos de laboratórios foram, e ainda são, desenvolvidos. Os métodos de campo são os que empregam diversos sensores de determinação da umidade ou o princípio da gravimetria (Richardt & Timm, 2004; Libardi, 2012). Já nos métodos de laboratório podem ser utilizados os funis de Haines a mesa de tensão, as câmaras de Richards, os minitensiômetros e os psicrômetros, dentre outros. Ressalta-se que em diversas metodologias não consegue-se estabelecer a faixa completa da relação entre tensão e umidade.

Na obtenção de dados confiáveis, por equipamentos que utilizam o processo de aplicação de tensão por meio de sucção, tem-se como base o estabelecimento de um contato hidráulico entre o solo e o meio poroso, o qual possui poros tão pequenos que o solo permaneça umedecido, até que elevada tensão seja estabelecida (Townend et al., 2000).

1.4.1.1. Funil de Haines

O funil de Haines, ou mais conhecido com funil de placa porosa, é um equipamento utilizado para aplicar determinada tensão na amostra volumétrica de solo, até atingir o equilíbrio, ou seja, aplicar determinada sucção até que a condição de equilíbrio seja alcançada, momento em que a drenagem de água cessa. O princípio do funcionamento descrito por Cássaro et al. (2008), ocorre quando se gera um desnível entre o tubo flexível e o suporte que contém a placa porosa, a tensão ocasionada pela diferença da altura faz com que apareçam meniscos com um determinado valor de raio de curvatura nos poros que constituem a placa porosa.

Reichard & Timm (2004) relatam que quando ocorre a passagem de ar através da placa porosa há o rompimento desse menisco. Resumidamente, o fenômeno consiste no aumento do desnível, que reduz a pressão interna no menisco, ocasionando o desprendimento

do vapor de água e ar do líquido, rompendo assim a continuidade da coluna de água. Acrescentam os autores que a ocorrência desse desnível se constitui até um determinado valor máximo, prático de 8,5 mca, devido ao ar dissolvido na coluna de água.

A metodologia do funil Haines é considerada barata, de fácil instalação e entendimento, podendo ser trabalhar em várias tensões. Entretanto, tem-se como principal limitação o uso de apenas uma amostra de solo por vez, necessitando-se de vários funis para realizar a determinação da curva de retenção em vários pontos amostrais simultaneamente.

1.4.1.2. Mesa de tensão

Tentando amenizar as limitações do princípio do funil de Haines, Leamer & Shaw (1941) e Oliveira (1968) propuseram o uso de uma mesa tensão, a qual opera utilizando o mesmo princípio do funil de Haines, ou seja, aplicando-se sucções na base das amostras. Ao invés de se utilizar a placa, utiliza-se de outro meio poroso conhecido como papel mata-borrão ou de pó de quartzo, que recentemente vem sendo bastante utilizado nos laboratórios. Na mesa de tensão, tem-se a vantagem de se trabalhar em várias tensões e com várias amostras simultaneamente. Contudo, não possibilita aplicar tensões relativamente elevadas, próximas à capacidade de campo, além de requerer a troca constante do papel mata-borrão.

Lima & Silva (2008) apresentaram um método prático e fácil para construção de uma mesa de tensão com camadas de areia constituídas de quartzo moído, para ser utilizada na determinação da retenção de água no solo até a tensão de 100 hPa. Os dados obtidos na mesa de areia foram confiáveis para determinação da curva de retenção até 100 hPa, independentemente dos teores de argila e matéria orgânica.

Romano et al. (2002) consideram que o equilíbrio hidráulico das amostras de solo ocorre quando suas massas não diferirem mais do que 0,1 g, em pelo menos duas determinações consecutivas.

Os pontos de tensão que são utilizados na mesa de tensão ou no funil de Haines são considerados muito importantes para estudos de perda de água, fertilizantes e agroquímicos no solo (Andrade et al., 2008). Ademais, sabe-se da importância nos estudos de retenção da água e na diferenciação entre os poros capilares (microporos) e não capilares.

1.4.1.3. Câmara de Pressão

O método da câmara de pressão de Richards Richards & Fireman (1943) é considerado clássico e mais utilizado para determinar os pontos da curva de tensão versus umidade, ocorrendo o equilíbrio entre a água retida na matriz e a tensão aplicada. O método possibilita a aplicação de tensões até 20000 hPa em amostras de solos, retirando-se a água retida no solo com energia por unidade de volume de água (Andrade et al., 2008).

O contato hidráulico das amostras de solo com a placa porosa no interior da câmara é de importância, para garantir dados confiáveis. Após o contato as amostras são submetidas a um processo de pressão, injetando-se o ar no interior da câmara com auxílio de um compressor, de maneira que a pressão interna aumente gradativamente até a pressão desejada, fazendo com que a água da amostra mova-se para a placa porosa. Abaixo da placa, há um diafragma de borracha, que se conecta com o exterior da câmara por meio de um tubo de drenagem, ejetando o excesso de água em forma de gotas.

Segundo Costa et al. (2008), apesar de ser considerado um método padrão para se determinar a curva de retenção, o método possui algumas desvantagens como o custo elevado dos aparelhos. O mal contato entre as amostras e a placa porosa, provoca a interrupção da drenagem. A demora na obtenção dos pontos necessários para o levantamento da curva resultando em outro aspecto limitante.

1.4.1.4. Método da Centrifuga

O método que se baseia na centrifugação de uma amostra de solo deformada ou indeformada, previamente saturada, para cada rotação escolhida na determinação da curva é correlacionada uma tensão (Costa et al., 2008). Em relação à câmara de Richards, o método tem como vantagem promover a rapidez na obtenção do equilíbrio da umidade no solo. Cincos tipos de solos estudados por Silva & Azevedo (2002), com o método tradicional de centrifugação, indicaram tempo superior a 80 min. Os autores ressaltam que o período de rotação é fator imprescindível na determinação da curva de retenção.

Como desvantagem, na centrifugação pode ocorrer a presença de grumos, dificultando e limitando o fatiamento das amostras, tornando-as compactadas no processo (Costa et al., 2008). Outro fator observado por Silva & Azevedo (2002) é que a temperatura interna do equipamento, onde estão alojadas as amostras de solo, deve permanecer entre 16 e 21 °C durante os ensaios, devido a tensão superficial da água.

1.4.1.5. Método do psicrômetro

O método consiste em realizar medições de tensão em amostras deformadas com rapidez. É um método relativamente novo e vem sendo testado por alguns pesquisadores na Física do Solo, sendo o WP4 o equipamento psicrômetro mais utilizado.

O equipamento tem por objetivo determinar a umidade relativa de equilíbrio, entre a pressão de vapor de saturação do ar na amostra e a pressão de vapor do ar na câmara de leitura do equipamento, em condições isotérmicas e com o recipiente selado. Em seguida, obtêm-se as temperaturas do ponto de orvalho do ar e da amostra para calcular, por meio da equação de Kelvin, o potencial da água a partir de sua atividade. Assim, segundo Costa et al. (2008), a partir da equação geral de estado ($pV = nRT$), o potencial da água na amostra pode ser calculado com a eq.(1).

$$|\psi_m| = \left(\frac{R T}{M} \right) \ln \left(\frac{e}{e_0} \right) \quad (1)$$

em que: ψ_m : potencial da água da amostra, MPa; e : pressão do vapor do ar do solo, hPa ; e_0 : pressão de saturação de vapor do ar na mesma temperatura do ar da amostra, hPa; R : constante ideal dos gases, ($8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$); T : temperatura da amostra, K; M : massa molar da água, mol.

Segundo o fabricante, o aparelho possui a vantagem de proporcionar rápidas leituras, em média 5 min por amostra, permitindo a determinação completa da curva de retenção em poucas horas. Porém, o equipamento apresenta a desvantagem de ser afetado por mudanças bruscas de temperatura do ambiente (Costa et al., 2008).

Ademais, observou-se que o equipamento possui pouca precisão e exatidão na faixa úmida da curva de retenção, onde são caracterizados pontos importantes quando se tratam de física do solo, hidrologia, conservação do “solo e água” e irrigação. Os resultados obtidos por Klein et al. (2010) indicaram que, em tensões menores que 1000 hPa o psicrômetro WP4 mostrou-se inexato, recomendando assim o não uso nessas condições. Contudo, o autor comenta sobre a conviência do equipamento para determinação de um único ponto da curva de retenção, o ponto de murcha permanente (PMP).

Ao comparar o método da centrífuga e do psicrômetro Costa et al. (2008), observaram nítidas diferenças entre os dois métodos, com umidade disponível de 0,133 e

$0,228 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Verifica-se que os resultados obtidos com o psicrômetro subestimaram aqueles obtidos pelo método da centrífuga.

Diante dos métodos considerados, verifica-se que o uso conjunto de outras metodologias em estudos de retenção de água no solo pode melhorar a obtenção da curva de retenção, englobando uma extensa amplitude de tensão (Carducci et al., 2011).

1.4.2. FUNÇÃO CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

A determinação da curva de retenção de água do solo (CRA) é essencial ao analisar o comportamento da água na matriz do solo. A CRA representa a relação entre a umidade volumétrica e a energia com a qual a água está retida nas partículas minerais ou orgânicas do solo. Com base nessa relação, é traçada uma curva para representar o comportamento e as características de retenção da água do solo. Libardi (2012) descreve que é um parâmetro físico que relaciona o conteúdo relativo de água e o $|\psi_m|$ (Figura 1), variando no tempo e no espaço, cujas informações auxiliam na obtenção de outros parâmetros hidráulicos do solo.

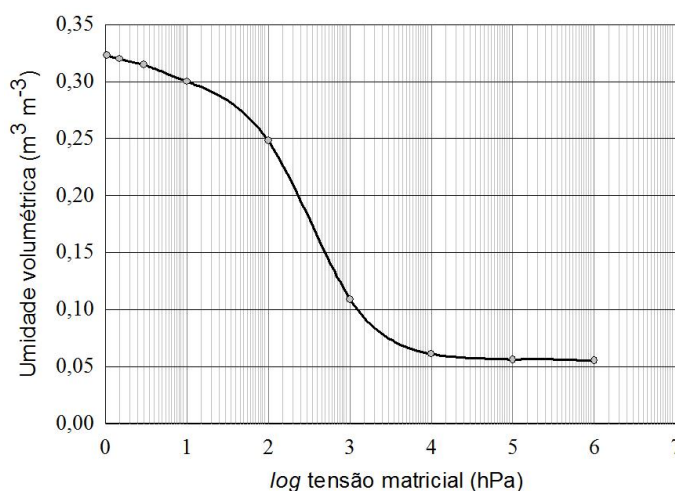


Figura 1. Exemplo de uma curva de retenção de água no solo (CRA).

No ajuste da CRA, quanto maior o número de pontos, maior será sua representatividade, no entanto, também mais oneroso será seu levantamento (Silva et al. 2006). Solos argilosos por possuírem maior quantidade de material coloidal, maior volume poroso, devido maior porcentagem de poros com menores diâmetros e maior superfície específica, possuem maior capacidade de reter água, em relação aos solos arenosos, resultando em maior faixa de retenção e água (Reichard & Timm, 2004). Vários são os

métodos para elaboração da CRA, no entanto, a obtenção exata dos pontos da CRA em solos argilosos chega a requerer um tempo de 3 a 4 meses. Outro problema está relacionado ao custo elevado de aquisição dos aparelhos utilizados em alguns processos.

Entretanto, um modelo teórico ainda não foi desenvolvido para explicar a CRA (Kastanek & Nielsen, 2001). Logo, alguns modelos empíricos são utilizados para obter a relação existente entre umidade e os potenciais exercidos na matriz do solo. Dentre eles podem-se descrever modelos de Brooks & Corey (1964); van Genuchten (1980); Durner (1994); Kosugi (1996) e Kastanek & Nielsen (2001).

O modelo de van Genuchten (1980) destaca-se pela extensa utilização (Libardi, 2012; Pevedello & Armindo, 2015), eq.(2).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\lambda |\psi_m|)^n\right]^m} \quad (2)$$

em que: θ : umidade volumétrica do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; θ_s e θ_r : umidade volumétrica na saturação e residual do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; ψ_m : potencial matricial da água no solo, hPa; $\lambda(\text{hPa}^{-1})$, n e m : parâmetros de ajuste do modelo.

Os parâmetros empíricos λ , m e n da eq.(2) podem ser estimados mediante utilização de recursos computacionais considerando ou não a restrição de Mualem (1976) [$m = (n-1)/n$].

A θ_s é o ponto da curva de retenção correspondente a nulidade da tensão; a θ_r pode ser considerada um parâmetro de extrapolação e, portanto, representar a menor umidade possível em um solo; λ é um parâmetro cujo seu inverso pode referir-se ao valor de entrada de ar ou pressão de borbulhamento; e, n está associado à distribuição de tamanho de poros que afeta a inclinação da função de retenção (Silva et al., 2006).

Devido à dificuldade de encontrar o ajuste mais eficiente, van Genuchten et al. (2015) desenvolveu um programa computacional RETC com 12 opções de modelos analíticos presentes na literatura, para descrever a CRA. O RETC tem por objetivo ajustar uma equação que minimize a soma dos quadrados dos resíduos do modelo escolhido. Resumidamente, faz uma aproximação não linear pelos mínimos quadrados, estimando os parâmetros desconhecidos do modelo, a partir de dados observados de retenção e/ou de condutividade do solo não saturado. A aproximação baseia-se na partição da soma total dos quadrados dos resultados em torno daqueles previstos com o modelo.

1.4.2.1. Histerese

Outra observação importante na obtenção da CRA, conforme Lucas (2010), é que a curva que relaciona o $|\psi_m|$ e a umidade volumétrica do solo deve ser considerada não unívoca, uma vez que essa pode ser obtida de duas maneiras: *i*) por dessorção (secamento): consiste em saturar a amostra de solo com água inicialmente e aplicar gradualmente sucções maiores tomando assim medidas sucessivas de $|\psi_m|$ e umidade volumétrica do solo; e *ii*) Por sorção (umedecimento): ao contrário da saturação, seca-se a amostra de solo e, posteriormente, permite-se seu umedecimento gradual por redução da tensão (Libardi, 2012).

A depender da forma de obtenção da CRA, obtém-se uma curva distinta, que não sobrepõe a outra curva. Com isso, os valores de uma mesma umidade corresponderão a tensões diferentes, a partir da metodologia de determinação escolhida. A dependência do equilíbrio e do estado da água do solo sobre a direção do processo dominante é conhecido como histerese (Reichard & Timm, 2004). Apresentando as curvas de molhamento e secamento não univocas, como observado na (Figura 2).

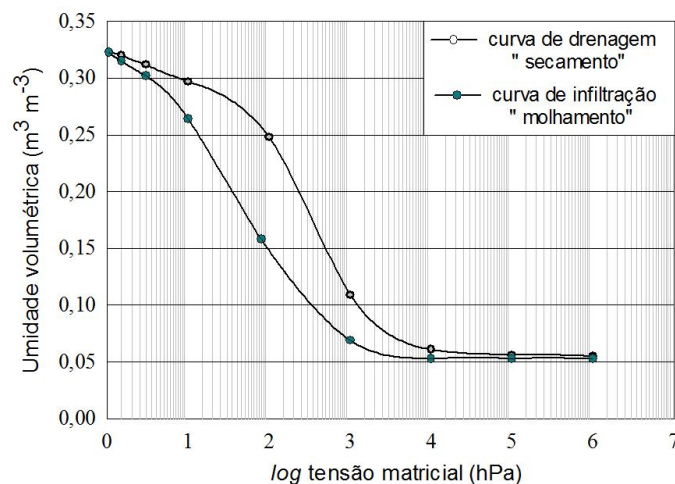


Figura 2. Curva de retenção de água no solo com efeito da histerese, resultado dos processos de secamento e molhamento.

A histerese decorre devido à diferença do ângulo de contato da água que recua e avança no espaço poroso do solo, o tipo de partículas minerais e orgânicas que favorecem a maior ou menor expansão, ou contração dos colóides do solo, bem como a não uniformidade dos raios dos poros capilares do solo, apresentando bolhas de ar capturadas (poros bloqueados) pelos vazios do solo durante o umedecimento (Costa et al., 2008).

A histerese dificulta a descrição física do fluxo de água no solo, especialmente quando ocorrem simultaneamente os processos de molhamento e secamento. Evitando parcialmente o problema da histerese, adota-se geralmente a CRA de molhamento para descrever o fenômeno da infiltração e a CRA de secamento, quando o fenômeno for à evaporação da água no solo (Reichardt & Timm, 2004).

1.4.2.2. Importância da curva de retenção de água no solo

A umidade do solo é uma variável utilizada em vários estudos científicos, dentre eles os que envolvem agricultura, hidrologia, meteorologia e modelagem de processos físicos do solo. Desse modo, a pesquisa por modelos como a CRA capazes de descrever o transporte de água no solo é importante, sobretudo para obter o melhor manejo ambiental e otimizar as práticas agrícolas (Reichardt & Timm, 2004).

Por meio da CRA obtém-se uma série de informações da área experimental, destacando-se a frequência de distribuição dos poros, umidade utilizada no manejo da atividade agrícola e os parâmetros utilizados em equacionamentos das funções hidráulicas do solo. Sua forma está correlacionada com algumas propriedades, tais como tamanho de poros, estrutura e adequação das partículas do solo. Assim, a CRA é fortemente dependente do manejo, sendo por si só uma indicadora da qualidade física do solo.

A necessidade de informações da dinâmica da água no solo tornou-se muito importante. Medeiros et al. (2014) relatam que os problemas agrícolas e ambientais relacionados ao manejo da água nos sistemas agrícolas vem crescendo com a demanda da globalização. Assim o conhecimento da CRA, auxilia na quantificação da água disponível para as plantas e estudos do movimento de solutos no solo (principalmente em estudos de poluição do solo e dos aquíferos), e também, na interação solo-planta-atmosfera.

Nos solos arenosos, devido às partículas serem maiores, há maior proporção de poros grandes. Logo, em pequenas sucções a perda de água no solo é rápida proporcionada o efeito de cadeira na curva, conforme ilustrado para diferentes tipos de solo (Figura 3).

Os solos com textura arenosa apresentam menor capacidade de retenção de água, por apresentarem poros grandes e interconectados na matriz do solo. A entrada de ar ocorre para pequenos valores de tensão, apresentando em geral pequenas variações de diâmetro de poros, dessaturando rapidamente após atingirem a tensão de entrada de ar (Prevedello & Armindo, 2015).

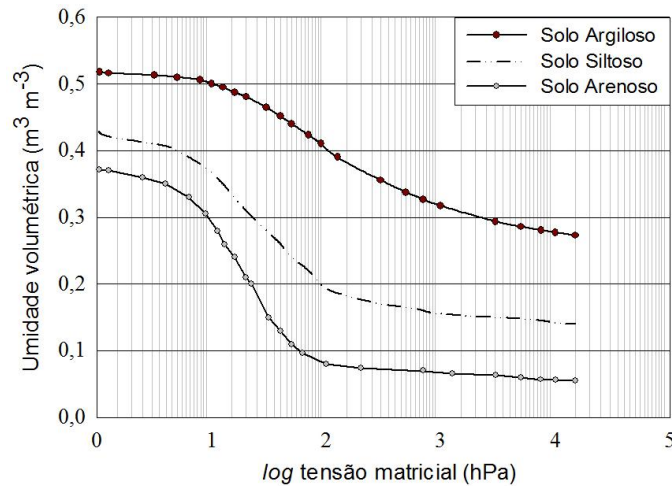


Figura 3. Representação esquemática das curvas típicas de retenção de água para três tipos de solos com textura arenosa, siltosa e argilosa.

Os solos argilosos apresentam comportamento diferente dos arenosos, dessaturando mais lentamente, por possuírem melhor distribuição dos poros com diâmetros diferentes. Assim uma parcela dos poros é drenada a cada tensão aplicada, proporcionando o efeito mais alongado na curva (Oliveira et al., 2002). Os solos siltosos, por sua vez, apresentam comportamento intermediário entre os arenosos e argilosos.

1.4.3. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES E FUNÇÕES HIDRÁULICAS DO SOLO POR MEIO DOS PARÂMETROS DA CRA

Por meio da CRA, obtêm-se os valores da umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) e do ponto de murchamento permanente (θ_{pmp}), que são parâmetros importantes para o conhecimento da capacidade de água disponível no solo (CAD). Permitindo analisar a eficiência do uso da água pelas plantas, evitando a contaminação do lençol freático por lixiviação de fertilizantes e agroquímicos (Brito et al., 2011; Libardi, 2012).

1.4.3.1. Capacidade de Água Disponível

Segundo van Lier (2010), a determinação da CAD é obtida fazendo a diferença entre a θ_{cc} e a θ_{pmp} , correspondente a tensão matricial de 15000 hPa, para uma determinada profundidade de solo [$CAD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) z$].

A CAD apresenta importância nos estudos referentes ao balanço hídrico do solo, contribuindo para o entendimento dos processos de degradação e conservação dos recursos

naturais relacionados ao uso da água do solo. Dentre os trabalhos publicados Allen et al. (2011) destacam a importância das técnicas de medição de variáveis utilizadas nos modelos de balanço hídrico do solo. Há necessidade de cuidados experimentais para o avanço dos modelos e do estabelecimento das necessidades de água de irrigação, que traduz na diminuição de perdas econômicas substanciais causadas pela má gestão da água.

1.4.3.2. Umidade volumétrica na capacidade de campo

A determinação da θ_{cc} pode ser realizada quando a variação da umidade em relação ao tempo tender a zero ($d\theta/dt \rightarrow 0$), ou seja, quando a taxa de drenagem também tender a zero (Prevedello, 1999; Armindo, 2013), conforme eq.(3).

$$\theta_{cc} = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\left(\frac{K(\theta)}{K} \right)^{\left(\frac{1,5n+0,5}{0,5-2,5n} \right)} \right]^{\left(\frac{1-n}{1,5n+0,5} \right)} \quad (3)$$

em que: θ_{cc} : umidade volumétrica na capacidade de campo; θ_s e θ_r : umidade volumétrica na saturação e residual do solo, $m^3 m^{-3}$; K : condutividade hidráulica do solo saturado, $m s^{-1}$; $[K(\theta)/K]$: taxa de drenagem quando atingir 1% da condutividade hidráulica na saturação; n : parâmetro de ajuste da eq.(2).

Andrade & Stone (2011) estimaram a θ_{cc} em solos do Cerrado, utilizando a eq.(3), que tem por base o tempo de redistribuição da água do solo, proposto por Prevedello, (1999), que utilizou parâmetros θ_s , θ_r e n obtidos pela eq.(2). Assumindo-se que $K(\theta)$ é uma porcentagem da K , Andrade & Stone (2011) testaram cinco porcentagens, a qual 1% ajustou-se melhor aos dados, ou seja, $K(\theta)/K = 1\%$.

A necessidade da definição adequada da θ_{cc} deve-se à importância agrícola na estimativa da CAD ou na determinação da lâmina de irrigação adequada. θ_{cc} representa o conteúdo relativo máximo de água no solo para qual a perda de água por drenagem é pequena (van Lier, 2010).

Brito et al. (2011) comenta que a θ_{cc} é um parâmetro importante para o manejo adequado da irrigação. A partir da determinação confiável da θ_{cc} , pode-se otimizar a produtividade das culturas agrícolas, maximizando a eficiência do uso da água pelas plantas e evitando a contaminação do lençol freático por lixiviação de fertilizantes e agroquímicos.

1.4.3.3. Função condutividade hidráulica

O movimento da água na matriz do solo tem aplicações em vários estudos relacionados à agricultura quanto ao meio ambiente: irrigação, drenagem, lixiviação de nutrientes e poluentes. Uma adequada caracterização das propriedades hidráulicas do solo é indispensável para o entendimento dos processos que ocorrem no solo, dentre os quais se podem destacar a condutividade hidráulica.

Buckingham (1907) baseando-se na teoria dos fluxos de calor descreveu uma equação para o fluxo da água em meios porosos não saturados, muito semelhantes à equação de Darcy (1856). O autor correlacionou a condutividade hidráulica e a umidade no solo e, igualmente, entre o $|\psi_m|$ e a umidade no solo (Gonçalves, 2011). A eq. de Darcy é um caso particular da eq. de Buckingham, sendo atualmente denominada Buckingham-Darcy (Pevedello & Armindo, 2015). Mais tarde, Mualem (1976) introduziu uma teoria para prever a condutividade hidráulica do solo insaturado $[K(\theta)]$, valendo-se da eq.(4).

A determinação da $K(\theta)$ pode ser feita por métodos de laboratório ou de campo. Nas condições de laboratório os valores obtidos podem atingir um grau de precisão e exatidão superiores ao campo. Por outro lado, as condições de campo podem representar as condições naturais e com perturbações mínimas do solo, mas apresentando certo grau de complexidade (Gonçalves, 2011). Uma alternativa para quantificação da $K(\theta)$ são os métodos indiretos que tentam quantificá-la a partir de outras propriedades do meio poroso, cuja determinação seja mais fácil.

$$K(\theta) = K \left\{ \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{0,5} \left[1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right]^2 \right\} \quad (4)$$

em que: $K(\theta)$: condutividade hidráulica do solo insaturado, $m \ s^{-1}$; θ : umidade volumétrica atual, $m^3 \ m^{-3}$; θ_s e θ_r : umidade volumétrica na saturação e residual do solo, $m^3 \ m^{-3}$; K : condutividade hidráulica do solo saturado, $m \ s^{-1}$; m : constante empírica da eq.(2), adimensional.

1.4.3.4. Capacidade Específica da Água no Solo

A capacidade específica da água no solo $C(\theta)$ exerce importância no entendimento da distribuição dos poros do solo, sendo utilizada em vários estudos. A eq.(5) foi obtida por Pevedello & Armindo (2015), a partir da derivação da eq.(2).

$$C(\theta) = \frac{-n m \lambda^n (\theta_s - \theta_r) (\psi_m)^{n-1}}{\left[1 + (\lambda |\psi_m|^n)\right]^{m+1}} \quad (5)$$

em que: $C(\theta)$: capacidade específica do solo, hPa^{-1} ; θ_s e θ_r : umidade volumétrica na saturação e residual do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; ψ_m : potencial matricial, hPa ; λ (hPa^{-1}), n , m : constantes empíricos.

Várias são as aplicações da $C(\theta)$ nos estudos de avaliação da estrutura e propriedades hidráulicas do solo, Kobiyama et al. (1994) utilizaram simulações numéricas para avaliar a influência das minhocas sobre a estrutura porosa do solo. Com a $C(\theta)$ os autores quantificaram a distribuição dos poros do solo, avaliando a influência de diferentes populações de minhoca nas propriedades hidráulicas do solo. Conceição et al. (2014), também avaliaram o desempenho da utilização de seis substratos no solo quanto à alteração nas funções hidráulicas do solo: $K(\theta)$, $C(\theta)$ e $D(\theta)$.

Klein & Libardi (2002) avaliaram a distribuição dos poros, sob atividades agrícolas, quantificando as alterações devido ao manejo. Os autores constataram alteração na amplitude das curvas, o que significa que o manejo alterou o raio dos poros predominantes até à profundidade de 0,4 m. Concluíram que o uso e o manejo do solo alteraram consideravelmente o traçado das CRA's com a redução na porosidade e alteração na distribuição do diâmetro dos poros.

1.4.3.5. Função Difusividade Hidráulica do solo

A difusividade hidráulica do solo [$D(\theta)$] foi originalmente proposta por Buckingham (1907), mas somente Childs & Collis-Jorge (1948) a nomearam como função $D(\theta)$. A mesma pode ser definida pela eq.(6), como uma medida do fluxo de água do solo em um gradiente de umidade, em outras palavras um fator de proporcionalidade entre o fluxo e o gradiente de umidade (Pevedello & Armindo, 2015).

$$D(\theta) = \frac{K(\theta)}{C(\theta)} \quad (6)$$

em que: $D(\theta)$: difusividade hidráulica do solo, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$; $K(\theta)$: condutividade hidráulica do solo não saturado, m s^{-1} ; $C(\theta)$: capacidade específica do solo, hPa^{-1} .

A $D(\theta)$ pode ser interpretada como sendo a capacidade de expansão de um fluido em determinado intervalo de tempo, ou seja, a facilidade que o fluido tem de se expandir no espaço e no tempo em um determinado meio poroso (Conceição et al., 2014). Ressalta-se que a $K(\theta)$ é a propriedade do meio poroso em permitir o movimento de fluido através deste meio, sob a ação combinada da gravidade e pressão.

Para Conceição et al. (2014) a $D(\theta)$ é uma das funções hidráulicas do solo mais importantes a ser determinada, sendo imprescindível na previsão da absorção de água pelas plantas, estando relacionada com a evaporação de água.

1.4.4. FUNÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA (FPT)

Na tentativa de minimizar as limitações no estudo da dinâmica da água na matriz do solo, pesquisadores têm desenvolvido equações que relacionam variáveis de retenção de água, ou de condutividade hidráulica, com outras propriedades físicas do solo de fácil obtenção.

Devido à diversidade de termos encontrados na literatura para tentar descrever o significado para transformar dados existentes em informações inexistentes, Bouma (1989) introduziu o termo FPT para padronizar outros termos anteriormente utilizados com a mesma finalidade. Funções de pedotransferência (FPT's) podem ser definidas como funções que descrevem a relação física existente entre os atributos do solo de fácil determinação (densidades do solo e de partículas, distribuição granulométrica e matéria orgânica) com propriedades hidráulicas do solo (retenção de água e condutividade hidráulica) que são de difícil obtenção (McBratney et al., 2002; Haghverdi et al., 2014).

De forma geral, a FPT surgiu como a relação entre os parâmetros hidráulicos do solo e as propriedades e características mais facilmente mensuráveis, normalmente disponíveis a partir de levantamento de solos. Considerando a estreita relação entre as variáveis, pesquisadores como Tomasella et al. (2000); Schaap et al. (2001); McBratney et al. (2002); Tomasella et al. (2003); Tomasella et al. (2004); Mermoud & Xu (2006); Manyame et al. (2007); Lamorski et al. (2008); Omuto & Gumbe (2009); Ghanbarian-Alavijeh et al. (2010); Raghavendra & Mohanty (2011); Botula et al. (2012); Xiangsheng et al. (2013) e Haghverdi et al. (2014), dentre outros, elaboraram ou utilizaram FPT's para estimar principalmente a CRA. Utilizando equações de regressão que combinavam propriedades físicas e químicas do solo, principalmente, textura, densidade do solo e matéria orgânica.

A facilidade aparente de desenvolver FPT's não deve ofuscar várias questões básicas, como questões relevantes mencionadas por Wösten et al. (2001), referente: rigor e a confiabilidade e exatidão desejada em relação a outras fontes de incertezas; técnicas mais adequadas de avaliação dos erros sistemáticos; qualidade da base de dados na formulação; e, utilização das variáveis de entrada a serem incluídas em uma FPT.

Minasny et al. (2004) abordaram dois princípios básicos para definir as FPT's, evitando o mau uso. Descreveram-se que não deve predizer algo que é mais barato e de fácil determinação, bem como se deve avaliar a incerteza na obtenção da FPT, adotando-se a que proporcionar menor erro de variância ou que se ajustar melhor ao tipo de solo. Weynants et al. (2009) afirmaram que a maioria das FPT's disponíveis na literatura são muito limitadas, não incorporando informações sobre a estrutura do solo, que influenciam o comportamento hidráulico do solo. Os autores criticam a sua utilização generalizada em diversas regiões geográficas, diferentes daquelas para as quais foram desenvolvidas, e que geralmente apresentam geologia, hidrogeologia, clima e uso distinto dos solos.

Em termos gerais, as FPT's podem apresentar bom ajuste da CRA, contudo elas podem ocasionar baixo desempenho nas estimativas de umidades quando utilizadas em regiões que não foram desenvolvidas, apresentando condições ambientais diferentes. Tomasella et al. (2003) e Botula et al. (2012) acrescentam que a utilização de FPT's desenvolvidas para determinadas regiões, com distintos climas, podem induzir a erros nas saídas, quando utilizadas em outros solos formados em distintas condições climatológicas e pedológicas. Compostos como citrato-ditionito, bicarbonatos e óxidos de Ferro, apresentam grande importância nas validações das FPT's para a previsão de parâmetros de retenção de água dos solos tropicais. Dessa forma, a escolha da FPT adequada a necessidade é imprescindível, pois impede possíveis equívocos.

Outra questão para uma FPT está relacionada com a qualidade da base de dados obtidos para sua elaboração ou utilização, resultando em melhor representatividade do local a ser avaliado.

Atualmente, diversas FPT's vêm sendo utilizadas na ciência do solo, hidrologia e agrometeorologia. Barros et al. (2013), abordam que as funções FPT's podem auxiliar em diversos modelos para simulação do transporte de água, ar e solutos, regimes de temperatura dos solos, manejo e compactação do solo, estabilidade da estrutura e resistência a penetração do sistema radicular, química do solo e agricultura de precisão. Wösten et al. (2001)

acrescentam que estudos de monitoramento do transporte de produtos químicos nos solos e estudos correlacionados com as mudanças climáticas global dependem de modelos numéricos que simulam fluxo de calor e água na superfície do solo, descrevendo como água e compostos dissolvidos se movem para dentro e através do solo, sendo as FPT's uma alternativa na determinação dos parâmetros hidráulicos do solo.

Para Tomasella et al. (2003) a determinação da CRA e $K(\theta)$, por meio de FPT's são importantes no desenvolvimento da modelagem ambiental, sobretudo para o melhoramento de modelos com ênfase no comportamento hídrico do solo, destacando modelos como *Soil Plant Air Water* (SPAW), (Saxton & Willey, 2006); AquaCrop, (Steduto et al., 2009) e *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT) (Arnold et al., 1998), que necessitam de dados hidráulicos do solo.

Avaliando a aplicação das FPT's em áreas afins, podem-se destacar alguns trabalhos, como de Abbasi et al. (2012), que avaliaram a retenção da água em solo salino e alcalino provenientes do sul do Irã. Botula et al. (2012) teve como principal objetivo avaliar a capacidade da FPT's "ponto" e "paramétrica" publicada na literatura para prever a CRA dos solos no Baixo Congo. Wang et al. (2012), desenvolveram uma FPT não linear para solos arenosos na região de Beigou no país Zhangwu, para determinação da CRA e água disponível, comparando com redes neurais. Bayat et al. (2013) avaliaram a CRA por meio da combinação de redes neurais e a teoria fractal nas frações granulométricas de 148 amostras do Noroeste do Irã. Haghverdi et al. (2014) investigaram o impacto do método de extração de dados e distribuição dos dados de retenção de água para avaliar o desempenho das FPT's pseudo contínua em solos da Bélgica e Turquia.

No Brasil, trabalhos de Tomasella et al. (2000) e Hodnett & Tomasella (2002) foram os principais e de maior alcance regional, com informações de mais de 500 horizontes de solos de todo território nacional, objetivando subsidiar a aplicação das FPT's em modelos que avaliam mudanças climáticas globais. A variação do teor de silte no banco de dados utilizado pelos autores no desenvolvimento das FPT's variou entre 15 e 20% e raramente foi superior a 50%, afirmando que geralmente nos solos brasileiros o teor de silte é baixo, em relação aos solos de regiões temperadas.

Para Tomasella et al. (2003) as FPT's pontuais são mais precisas do que as paramétricas. A umidade depende de variáveis específicas para cada potencial da água no solo, e a dependência não se reflete de forma direta nos parâmetros empíricos dos modelos da

CRA. Medeiros et al. (2014) verificaram entre nove FPT's paramétricas testadas em solos de clima tropical, que o maior número de variáveis para estimar os parâmetros da CRA possibilitam maior eficiência.

Berg et al. (1997) e Tomasella et al. (2000) discutiram as diferenças físicas e químicas dos solos de regiões de clima temperado e tropical. As diferenças estão correlacionadas com o baixo desempenho das FPT's de solos de regiões temperadas, quando aplicadas aos solos de regiões tropicais, normalmente mais intemperizadas. Tomasella & Hodnett (1998) observaram que o conteúdo de argila excede aos 60% para solos de clima tropical, quando as FPT's desenvolvidas para solos temperados não cobrem essa magnitude. Os autores consideraram a importância da correlação entre os dados utilizados para calibração da FPT e os dados utilizados na predição.

A compreensão das particularidades de cada região, atrelada com a dependência espacial das propriedades do solo vem sendo cada vez mais requerida por pesquisadores que objetivam melhorar a interpretação dos resultados de experimentos de campo, fornecendo subsídios para novas pesquisas a custos reduzidos.

1.4.5. FUNÇÕES UTILIZADAS NO PROCESSO DE PEDOTRANSFERÊNCIA

1.4.5.1. Contínua e Classe

Dentro das FPT's usadas para gerar características hidráulicas do solo, Wösten et al. (1995) fizeram uma correlação simplificada entre dados físicos de fácil obtenção com propriedades hidráulicas do solo, realizando a subdivisão das informações e classificando-as como FPT de classe e contínua.

As FPT's de classe predizem as características hidráulicas com referência à classe textural à qual o solo pertence (por exemplo, Argilossolo, Latossolo, Neossolo), baseando-se em um agrupamento preliminar. As FPT's de classe descrita por Abbasi et al. (2012) foram desenvolvidas com baixo custo e são usadas para estimar o valor médio dos parâmetros hidráulicos para cada classe de textura do solo, embora sua precisão seja menor em comparação com as FPT's de ponto e paramétricas. Dentre as FPT's de classe existentes na literatura, destacam-se para os solos de regiões de clima temperado Bruand et al. (2004) e Baker, (2008), e para regiões tropicais as de Hodnett & Tomasella (2002).

As FPT's contínuas estimam propriedades hidráulicas do solo como CRA ou K, por meio de correlação estatística de um conjunto de dados de fácil medição (fração

granulométrica, densidade do solo e matéria orgânica), resultando uma função contínua das variáveis medidas (Wösten et al., 1995; Botula et al., 2014). Tanto as funções de classe quanto contínua apresentam baixos custos em sua elaboração e são de fácil entendimento (Botula et al., 2014).

1.4.5.2. Pontual e Paramétrica

Outras FPT's que são utilizadas com frequência por autores na quantificação da CRA classificam-se como pontual e paramétrica (Wösten et al., 2001; Sharma et al., 2006; Vereecken et al., 2010). A primeira consiste na determinação da umidade volumétrica em tensões pré-definidas, como as FPT's obtidas ou avaliadas por Tomasella et al. (2003) e Ghanbarian-Alavijeh et al. (2010).

Wösten et al. (2001) compararam o desempenho de três modelos de FPT's pontuais, para prever a umidade volumétrica do solo na tensão 330 hPa, usando as mesmas propriedades e características básicas do solo. O resultado obtido com os três métodos foram semelhantes, indicando que o melhor ajuste pode não ocorrer com o uso de modelos diferentes, mas com o melhor conjunto de dados. Barros et al. (2013) ressalta a simplicidade na sua elaboração quanto à técnica de regressão.

A abordagem paramétrica é feita a partir do ajuste dos parâmetros empíricos dos modelos que descrevem a CRA, como de Brooks & Corey (1964) e van Genuchten (1980). Com a FPT paramétrica é possível obter a umidade volumétrica do solo em qualquer ponto da CRA, como as FPT's de Vereecken et al. (1989); Wösten et al. (1999); Santra & Sankar (2008).

Botula et al. (2012) realizando estimativas da CRA para solos do Congo, adotando FPT's paramétricas disponíveis na literatura. A FPT de Hodnett & Tomasella (2002) foi a que obteve melhor desempenho para solos de climas tropicais, e a de Schaap et al., (2001) proporcionou os melhores resultados em climas temperados.

As FPT's de ponto desenvolvidas por Oliveira et al. (2002) no estado de Pernambuco, estimam a θ_{cc} e θ_{pmp} , para solos brasileiros. Reichert et al. (2009) desenvolveram FPT's em cinco pontos específicos para solos do Rio Grande do Sul, realizando correlações entre a fração granulométrica, matéria orgânica, densidade do solo e de partícula.

Valendo-se de regressões múltiplas, Giarola et al. (2002) propuseram uma FPT para solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, correlacionando a fração granulométrica e os teores de óxidos de Fe e Al com a θ_{cc} e θ_{pmp} .

1.4.5.3. Pseudo - contínua

A função de pedotransferência pseudo-contínua (FPT-PC) foi desenvolvida por Haghverdi et al. (2012). Nela, tem-se por objetivo prever a CRA sem a necessidade da utilização de um modelo que descreva a CRA, como de Brooks & Corey, (1964) e van Genuchten (1980). A abordagem FPT-PC tem um desempenho contínuo, permitindo prever a umidade volumétrica do solo em qualquer tensão desejável da CRA. A FPT-PC considerada na simulação o algoritmo da tensão como variável de entrada, além dos dados físicos básicos do solo, como densidade, distribuição granulométrica e matéria orgânica (Haghverdi et al., 2012).

Haghverdi et al. (2014) avaliaram a sensibilidade da variação de dois elementos no desempenho da FPT-PC em cenários, revelando que um conjunto bem distribuído de medição pontos de retenção de água resultou em até $0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de redução nos valores dos erros sistemáticos.

1.4.5.4. Redes Neurais

As Redes Neurais Artificiais (RNA's) são caracterizadas por arranjos que lembram a estrutura do cérebro humano. De acordo com Minasny & McBratney (2002b), a rede neural é uma tentativa de construção de modelos matemáticos que supostamente trabalhem em caminhos análogos ao cérebro humano.

Resumidamente Manyame et al. (2007) descrevem que a RNA é constituída por “nós” entre as camadas que ligam os dados de entrada (densidade do solo e tamanho de partículas), ocultos e de saída (propriedades hidráulicas do solo). A quantidade de nós na entrada, ocultos e de saída correspondem ao número de variáveis do modelo. O número ideal de nós na camada escondida tem que ser encontrado com o método de iterativo (Xiangsheng et al., 2013). A vantagem às FPT's tradicionais é que a RNA não exige um modelo do conceito a priori e possui calibração interativa entre os dados de entrada e saída, extraindo o máximo de informação possível (Schaap et al., 2001).

O processo de aprendizado da RNA é composto basicamente pela fase de treinamento e a fase de validação. A fase de treinamento consiste em calcular saídas a partir de dados de entrada, comparando os resultados medidos e calculados ajustando os “pesos” de cada nó para diminuir a diferença entre os valores medidos e previstos (Xiangsheng et al., 2013).

As FPT's com base em RNA foi introduzida em meados da década de noventa por Pachepsky et al. (1996), devido a necessidade de trabalhar com grandes bancos de dados. Em geral, os métodos baseados em RNA's contribuíram para o desempenho das FPT's na determinação das propriedades e funções hidráulicas do solo (Vereecken et al. , 2010). Isso se deve as desvantagens da regressão de FPT's, quando se utilizam grandes bancos de dados na estimativa dos parâmetros hidráulicos do solo (Wösten et al., 2001).

Bayat et al. (2013) relata que a arquitetura do modelo de RNA é única em relação as funções de transferência de camada de saída e o número de neurônios ocultos. Cada problema deve ser combinado com a camada de saída adequada e número de neurônios ocultos se tornando mais um passo na melhoria da estimativa da CRA. Os autores fizeram uma combinação de RNA e teoria fractal para prever a CRA. Os resultados obtidos mostraram que utilização da rede fractal para detalhar a distribuição da fração granulométrica melhora o desempenho da predição da CRA.

1.4.6. SOFTWARES PARA FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA

Alguns *softwares* de FPT's utilizam funções derivando FPT's utilizando RNA's ou uma compilação de FPT's publicadas. São ferramentas que auxiliam em trabalhos que utilizam extensos bancos de dados, como parâmetros de entrada.

Softwares como Soil Vision (Fredlund et al., 2000); *Rosetta* (Schaap et al., 2001); *Neuro-m* (Minasny et al., 2002a), estimam os parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) e $K(\theta)$. Os *softwares* SH-Pro (Cresswell et al., 2001); Neuropack (Minasny & McBratney, 2002b) e Soilpar (Acutis & Donatelli, 2003), utilizam FPT's já desenvolvidas, para prever parâmetros de equações da CRA e $K(\theta)$. O *software* SWLIMITS, desenvolvido por Suleiman & Ritchie (2001), prediz pontos da CRA.

Muitos *softwares* que simulam o fluxo de água no solo utilizam FPT's embutidas para prever as propriedades hidráulicas do solo, por exemplo, o SWAP (van Dam et al., 1997) que

utiliza as FPT's de Wösten et al. (1999); e o HYDRUS (Simunek et al., 2008) que utiliza o *Rosetta*, desenvolvido por Schaap et al., (2001).

1.4.6.1. *Rosetta*

Enquanto FPT's baseadas em RNA podem fornecer estimativas relativamente precisas, a interpretação ou publicação de forma explícita não é fácil, devido ao grande número de coeficientes. Para facilitar a aplicação da RNA, Schaap et al. (2001) desenvolveram um programa computacional denominado *Rosetta*, que implementa alguns dos modelos de FPT publicados por Schaap et al. (1998); Schaap & Leij (1998); Schaap & Leij (2000), para prever propriedades hidráulicas do solo. O *Rosetta* é baseado em uma RNA, associado ao método *bootstrap*, para estimativa dos parâmetros do modelo de van Genuchten e da condutividade hidráulica do solo saturado e não saturado. O modelo realiza combinações por meio do método *bootstrap* (Xiangsheng et al., 2013). O qual permite que o *software* forneça estimativas de incerteza dos parâmetros hidráulicos, amplamente utilizado por muitos cientistas da área como, Givi et al., (2004); Minasny et al. (2004); Schaap et al. (2001); Stumpp et al. (2009) e Xiangsheng et al. (2013).

A interface interna do *Rosetta* é constituída por três crivos, a primeira tela fornece informações gerais de registros de bancos de dados, a partir de 2.134 amostras que variam de solos de clima temperado a climas subtropicais da América do Norte e Europa, totalizando 20.574 pares de umidade volumétricas e tensão. Os valores de condutividade hidráulica saturada estão disponíveis para um subconjunto de 1.306 amostras de solo, enquanto a condutividade hidráulica não saturada é conhecida por 235 amostras de solo com um total de 4117 conjunto de pares (Schaap et al., 2001). A segunda tela serve para fazer estimativas de sete parâmetros hidráulicos com modelos H1-H5, C2-H1 e C2-H5. A terceira tela permite estimativas de K e do parâmetro hidráulico ℓ , de Mualem (1986), a partir de parâmetros de retenção embutidos utilizando o modelo C2-Fit.

O modelo H1 apresenta uma tabela simples, com média de parâmetros hidráulicos do solo para cada classe textural, por meio de dados disponibilizados pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). O segundo modelo (H2) é composto pela relação granulométrica (areia, silte, argila), em contraste com o primeiro, fornecendo parâmetros hidráulicos que variam continuamente com a textura. O terceiro modelo (H3) inclui a densidade do solo, além da porcentagem de areia, silte e argila. O quarto modelo (H4) inclui

como variável de entrada a umidade volumétrica do solo na tensão de 330 hPa, mais as variáveis do terceiro modelo. O último modelo (H5) difere somente do quarto modelo acrescentando a umidade volumétrica do solo na tensão de 15000 hPa.

O *Rosetta* propicia médias e desvios-padrão de 60 ou 100 conjuntos de parâmetros hidráulicos estimados, conforme gerado pelas RNA's dentro dos modelos H2-H5. Dessa forma, projeta-se uma estrutura hierárquica para permitir a entrada de grupos limitados e mais prolongados de preditores, resultando na combinação com o método de inicialização, desde a confiabilidade das estimativas de FPT's.

1.4.6.2. Neuropack

Desenvolvido por Minasny & McBratney (2002b), o *software* NEUROPACK é um programa computacional de RNA para ajustar FPT's pontuais e paramétricas. A NEUROPACK consiste em dois seguimentos nomeados como neuropath e neuroman. O primeiro é constituído por uma RNA com uma única camada, modelando qualquer relação dos dados de entrada e saída, os quais são posteriormente utilizados para validar e prever propriedades hidráulicas de novas amostras de solo. Enquanto isso, o segundo seguimento prevê o ajuste das FPT's paramétricas.

Minasny & McBratney (2002b) compararam os modelos NEUROPATH e *Rosetta*, obtendo melhor desempenho para o NEUROPACK. Os autores acrescentam ainda que para melhor predição dos parâmetros hidráulicos do solo, a composição do conjunto de dados é de grande importância. Portanto, as FPT's que são derivadas a partir de diferentes origens do que aquelas para as quais elas foram originalmente desenvolvidas, podem levar a dados com menor representatividade, sendo de grande importância avaliar a homogeneidade dos dados e seu desempenho.

A análise do desempenho do NEUROPACK *versus* o *Rosetta* foi realizada por Haghverdi et al. (2012) em três conjuntos de dados, o primeiro (DS1) correspondia a 122 amostras de solos da região do Irã, o segundo (DS2) e o terceiro (DS3) foram estabelecidos a partir de solos australianos composto no bando de dados do NEUROPACK. O DS2 contém 622 pares de umidade e tensão, com dados de solo similares ao DS1. A análise resultou em bom desempenho de ambos *softwares*, com melhores resultados utilizando dados do DS1 para solos do Irã.

1.4.6.3. Soilpar

Desenvolvido por Acutis & Donatelli (2003), o SOILPAR é um *software* para estimar parâmetros hidráulicos do solo com FPT's pontuais e paramétricas: 15 FPT's disponíveis na literatura, classificadas como FPT de ponto, para estimar pontos específicos e de interesse na CRA ou $K(\theta)$; e, estimativa contínua da CRA utilizando FPT's paramétricas, valendo de modelos como de Brooks & Corey (1964); Hutson & Cass (1987) e van Genuchten (1980). O resultado obtido consiste da média entre os dados estimados, usando ambos os índices e gráficos estatísticos.

Avantagem do SOILPAR em relação aos *softwares Rosetta* e SOILPAR está na forma de armazenamento de dados de solo em um banco de dados georreferenciado, podendo ser realizada a criação de mapas de variabilidade espacial dos atributos utilizando no formato ESRI.

1.4.7. MODELO FISICAMENTE FUNDAMENTADO NA ELABORAÇÃO DA FUNÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA

A utilização de modelos fisicamente fundamentados, como os modelos de Haverkamp & Parlange (1986), Arya & Paris (1981) e Tyler & Wheatcraft (1990), vale-se de alguns princípios físicos na elaboração de FPT's que utilizam a forma de similaridade entre a distribuição granulométrica com a de poros para estimar a retenção de água. O modelo de Arya & Paris (1981) estima os valores de umidade e tensão que seriam obtidos pela análise de retenção de água no solo. A estimativa ocorre a partir dos valores de diâmetro e concentração das partículas do solo, obtidos da distribuição granulométrica, adotando-se a conversão de frações de massa sólida em umidade e distribuição da porosidade em potencial hidráulico, por meio da equação de capilaridade.

O método adotado por Haverkamp & Parlange (1986), apud Barros et al. (2013), utiliza a relação linear entre o diâmetro da partícula e o raio do poro. A simplificação resulta em uma função de retenção com uma simples transformação linear da distribuição granulométrica, sendo válida para partículas relativamente uniformes como a areia.

Seguindo essa linha de raciocínio, Prevedello & Loyola (2002) desenvolveram um modelo que foi transcrito em um programa computacional, nomeado *Splintex* que utiliza a porcentagem acumulada da fração granulométrica, densidades do solo e das partículas. Como resposta, obtém-se os parâmetros θ_s , θ_r , λ , n e m do modelo de van Genuchten (1980). Para

melhor predição dos parâmetros obtidos, pode-se inserir a umidade volumétrica na saturação medida e um par de valores de umidade volumétrica e tensão, conhecido experimentalmente, a fim de se aumentar o desempenho da simulação.

O programa *Splintex* assume que a CRA tem a forma espelhada da curva de distribuição granulométrica acumulada. Com isso, Prevedello & Loyola (2002) utilizaram a função *spline* cúbica, para o ajuste da curva granulométrica acumulada, e o algoritmo de Arya & Paris (1981) para determinação da CRA. Esse algoritmo é baseado no cálculo da umidade volumétrica, a partir da contribuição de cada fração granulométrica, e na equação da capilaridade, que relaciona o $|\psi_m|$ com o raio do poro.

Mohammadi & Meskini-Vishkaee (2013) desenvolveram um processo denominado (MV) para prever a CRA a partir de um número limitado de pontos de dados experimentais e distribuição da fração granulométrica. Os autores realizaram uma comparação do processo com os resultados obtidos a partir do modelo Arya & Paris (1981), obtendo bons resultados.

1.5. CONCLUSÕES

O conhecimento da dinâmica da água no solo é um grande aliado para tomadas de decisões nos aspectos que envolvem o ambiente. A busca por modelos de fácil obtenção e fisicamente fundamentados para quantificação dos processos hidráulicos do solo, estão sendo utilizados no meio científico. Neste contexto, a FPT é uma alternativa útil, que pode ser utilizada para contornar as dificuldades de medições, permitindo o monitoramento em grande escala.

1.6. LITERATURA CITADA

ABBASI, F.; JAVAUX, M.; VANCLOOSTER, M. & FEYEN, J. Estimating hysteresis in the soil water retention curve from monolith experiments. *Geoderma*, 189, 480-490, 2012.

ACUTIS, M. & DONATELLI, M. SOILPAR 2.00, software to estimate soil hydrological parameters and functions. *European Journal of Agronomy*, 18, 373-377, 2003.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.; HOWELL, T.A. & JENSEN, M.E. Evapotranspiration information reporting: I. factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98:899-920, 2011.

ANDRADE, C.L.T.; BORGES JUNIOR, J.C.F. & COUTO, L. Características Físico-hídricas e dinâmica de água no solo. In: ALBUQUERQUE, P.E.P.; DURÃES, F. O.M. *Uso e manejo de irrigação*, Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2008. p.71-149.

ANDRADE, R.S. & STONE, L.F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15:111-116, 2011.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S. & WILLIAMS, J. R. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *Journal American Water Resort*, 34:73-89, 1998.

ARYA, L.M. & PARIS, J.F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society American*, 45:1023-1030, 1981.

ARMINDO, R.A. Índices baseados no modelo de van genuchten como indicadores da qualidade física do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Florianópolis, 2013. Anais. Florianópolis, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2013.

BARROS, A.H.C.; VAN LIER, Q.J.; MAIA, A.H.N. & SCARPARE, F.V. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern Brazil. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 37:379-391, 2013.

BAKER, L. Development of class pedotransfer functions of soil water retention - A refinement. *Geoderma*, 144:225-230, 2008.

BAYAT, H.; NEYSHABURI, M.R.; MOHAMMADI, K.; ZADEH, N.N.; IRANNEJAD, M. & GREGORY, A.S. Combination of artificial neural networks and fractal theory to predict soil water retention curve. *Computers and Electronics in Agriculture*, 92:92-103, 2013.

BOTULA, Y.D.; CORNELIS, W.M.; BAERT, G. & VAN RANST, E. Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (D.R. Congo). *Agricultural Water Management*, 111:1-10, 2012.

BOTULA, Y.D.; RANST, E.V. & CORNELIS, W.M. Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: a review. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 38:679-698, 2014.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *advance soil science*, 9:177-213, 1989.

BUCKINGHAM, E. Studies on the movement of soil moisture. Washington: USDA, 1907. 61p. (Soils Bulletin, 38).

BRITO, A.S.; LIBARDI, P.L.; MOTA, J.C.A. & MORAES, S.O. Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 35:1939-1948, 2011.

BROOKS, R.H. & COREY, A.T. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper* 3, Colorado State University, Fort Collins, USA, 1964. 71p

BRUAND, A.; DUVAL, O. & COUSIN, I. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO: Une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture, et sa densité apparente. *Etude Gestion des Sols*, 11:323-332, 2004.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C & ZEVIANI, W.M. Modelagem da curva de retenção de água de latossolos utilizando a equação duplo van-Genuchten. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:77-86, 2011.

CÁSSARO, F.A.M.; PIRES, L.F.; SANTOS, R.A.; GIMÉNEZ, D. & REICHARDT, K. Funil de Haines modificado: curvas de retenção de solos próximos à saturação. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 32:2555-2562, 2008.

COSTA, W.A.; OLIVEIRA, C.A.S. & KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 32:515-523, 2008.

CONCEIÇÃO, B.; LIMA, L.A.; SANTANA. & ANDRADE, R. Difusividade e condutividade hidráulica não saturada de substratos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18:608-614, 2014.

CHILDS, E.C. & COLLIS-GEORGE, N. Soil geometry and soil water equilibrium. *Discussions of the Faraday Society*, 3:78–85, 1948.

CRESSWELL, H.P.; PIERRET, C.; BREBNER, P. & PAYDAR, Z. The SH-Pro V1.03 software for predicting and analyzing soil hydraulic properties. CSIRO Land & Water, Canberra, Australia, 2001.

DARCY, H. *Les fontaines publiques de la Ville de Dijon*. Paris: Cictor Dalmor, 1856.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, *Journal of the American Water Resources Association*, 30:211-223, 1994.

FREDLUND, M.D.; FREDLUND, D.G.; WILSON, G.W. An equation to represent grain-size distribution. *Canadian Geotechnical J.*, 37:817-827, 2000.

GIVI, J.; PRASHER, S. & PATEL, R.M. Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point. *Agricultural Water Management*, 70, 83-96, 2004.

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P. & IMHOFF, S. Relationships between physical soil properties and characteristics of south Brazilian soil. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 26:885-893, 2002.

GOLÇALVES, A.D.M.A. Uma análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. Piracicaba, Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011. 123p. (Tese de Doutorado).

GHANBARIAN-ALAVIJEH, B.; LIAGHAT, A.; HUANG, G.H. & VAN GENUCHTEN, M.T. Estimation of the van Genuchten soil water retention properties from soil textural data. *Soil Science Society of China*, 20: 456–465, 2010.

HAVERKAMP, R. & PARLANGE, J.Y. Predicting the water retention curve from a particle size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. *Soil Science*, 142:325-339, 1986.

HAGHVERDI, A.; CORNELIS, W.M. & GHAFRAMAN, B. A pseudo-continuous neural network approach for developing water retention pedotransfer functions with limited data. *Journal of Hydrology*, 442:46-54, 2012.

HAGHVERDI, A.; ÖZTÜRK, H.S. & CORNELIS, W.M. Revisiting the pseudo continuous pedotransfer function concept: Impact of data quality and data mining method. *Geoderma*, 227:31-38, 2014.

HODNETT, M.G. & TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedotransfer function developed for tropical soils. *Geoderma*, 108:155-180, 2002.

HUTSON, J.L. & CASS, A. A retentivity function for use in soil-water simulation models. *Soil Science Society of America Journal*, 38:105-113, 1987.

KASTANEK, F.J. & NIELSEN, D.R. Description of soil water characteristic using cubic spline interpolation. *Soil Science Society of America Journal*, 65:279-283, 2001.

KOBIYAMA, M.; BARCIK, C. & SANTOS, H. R. Influência da Minhoca (*Amyntas Hawayanus*) Sobre A Produção de Matéria seca de Bracatinga (*Mimosa Scabrella Benth*). *Revista do Setor de Ciências Agrárias*, 13:199-203, 1994.

KOSUGI, K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, *Water Resources Research*, 32:2697-2703, 1996.

KLEIN, V.A. & LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26:857-867, 2002.

KLEIN, V.A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. & MARCOLIN, C.D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. *Ciência Rural*, 40: 1550-1556, 2010.

LAMORSKI, K.; PACHEPSKY, Y.; SLAWIHSKI, C. & WALCZAK, R.T. Using support vector machines to develop pedotransfer functions for water retention of soils in Poland. *Soil Science Society of America Journal*, 72:1243-1247, 2008.

LEAMER, R.W. & SHAW, B. A simple apparatus for measuring noncapillary porosity an extensive scale. *Journal American Society Agronomy*, 33:1003-1008, 1941.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. 2ed. Edusp, São Paulo, 2012. 335p.

LIMA, H.V. & SILVA, Á.P. Mesa de tensão com areia: procedimentos para montagem e validação. Revista Brasileira Ciência do Solo, 32:2209-2214, 2008.

LUCAS, J.F.R. Obtenção da curva de retenção de água no solo pela câmara compressão triaxial e pelo papel filtro. Cascavel, Universidade Estadual Oeste do Paraná – UNIOESTER, 2010. 62p. (Tese de Mestrado).

MERMOUD, A. & XUB, D. Comparative analysis of three methods to generate soil hydraulic functions. Soil & Tillage Research, 87:89-100, 2006.

MANYAME, C.; MORGAN, C.L.; HEILMAN, J.L.; FATONDJI, D.; GERARD, B. & PAYNE, W.A. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. Geoderma, 141:407-415, 2007.

MEDEIROS, J.C.; COOPER, M.; ROSA, J.D, GRIMALDI, M. & COQUET, Y. Assessment of pedotransfer functions for estimating soil water retention curves for the amazon region. Revista Brasileira Ciência do Solo, 38:730-743, 2014.

MINASNY, B. & MCBRATNEY, A.B. The *neuro-m* method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. Soil Science Society of America Journal, 66:352-361, 2002a.

MINASNY, B. & MCBRATNEY, A.B. Neuropack: Neural Network package for fitting pedotransfer functions. Sydney, From the Australian Centre for Precision Agriculture, 2002b. 18p. (Technical Note, 1).

MINASNY, B.; HOPMANS, J.W. & HARTER, T. Neural networks prediction of soil hydraulic functions for alluvial soils using multistep outflow data. Soil Science Society of America Journal 68, 417-429, 2004.

MOHAMMADI, M.H & MESKINI-VISHKAEE, F. Predicting Soil Moisture Characteristic Curves from Continuous Particle-Size Distribution Data. Pedosphere, 23:70-80, 2013.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, 12:513-522, 1976.

MCBRATNEY, A.B.; MINASNY, B.; CATTLE, S.R. & VERVOORT, R.W. From pedotransfer functions to soil inference systems. Geoderma, 109:41-73, 2002.

OMUTO, C.T. & GUMBE, L.O. Estimating water infiltration and retention characteristics using a computer program in R. Computers & Geosciences, 35:579-585, 2009.

OLIVEIRA, L.B. Determinação da macro e microporosidade pela “mesa de tensão” em amostras de solo com estrutura indeformada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 3:197-200, 1968.

OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; RODRIGUES, J. J. V. & MARQUES, F. A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 26:315-323, 2002.

PACHEPSKY, Y.A.; TIMLIN, D. & VÁRALLYAY, G. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Science Society of America Journal*, 60:727-733, 1996.

PREVEDELLO, C. L. Novo método para estimativa da umidade do solo na condição de capacidade de campo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 4:23-28, 1999.

PREVEDELLO, C.L. & LOYOLA, J.M.T. Modelo para estimar as propriedades hidráulicas de meios porosos a partir da curva granulométrica. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo, 2002. Anais. São Paulo, ABMS, 2002. p.467-472.

PREVEDELLO & ARMINDO. Física do solo: com problemas resolvidos. 2.ed. rev. e ampl. Curitiba. C. L. Prevedello, 2015. 474p.

RAGHAVENDRA, B.J. & MOHANTY, B.P. Enhancing PTF's with remotely sensed data for multi-scale soil water retention estimation. *Journal of Hydrology*, 399:201-211, 2011.

REICHARDT, K. & TIMM, L.C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. 2. ed. Barueri. Manole, 2004. 500p.

REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; URACH, F.L. & CARLESSO, R. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 33:1547-1560, 2009.

RICHARDS, L.A. & FIREMAN, M. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. *Soil Science*, 56:395-404, 1943.

ROMANO, N.; HOPMANS, J.W. & DANE, J.H. Suction table. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C., eds. *Methods of soil analysis*. Madison, Soil Science Society of America, 2002. p.692-698.

SANTRA, P. & SANKAR, B.D. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India, *Geoderma*, 146:439-448, 2008.

SAXTON, K.E. & WILLEY, P.H. The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. In: Singh, V.P. & Frevert, D.K., eds. *Watershed models*. Boca Raton, CRC Press, 2006. p.401-435.

SILVA, E.M. & AZEVEDO, J.A. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37:1487-1494, 2002.

SILVA, E.M.; LIMA, J.E.F.W.; AZEVEDO, J.A. & RODRIGUES, L.N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 41:323-330, 2006.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.Th. & SEJNA, M. Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes, Vadose Zone Journal, 7:587-600, 2008.

SCHAAP, M.G. & LEIJ, F.J., van Genuchten, M.Th. Neural networks analysis for hierarchical prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. Soil Science Society American Journal. 62:847-855, 1998.

SCHAAP, M.G. & LEIJ, F.J. 1998. Database related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. Soil Science. 163:765-779, 1998.

SCHAAP, M.G. & LEIJ, F.J. 2000. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten model. Soil Science Society American Journal. 64:843-851, 2000.

SCHAAP, M.G.; LEIJ, F.J. & VAN GENUCHTEN, M.Th. *Rosetta*: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Journal Hydrology, 251:163-176, 2001.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; RAES, D. & FERERES, E. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water. I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal, 101:426-437, 2009.

STUMPP, C.; ENGELHARDT, S. & HOFMANN, M. Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil hydraulic properties of prevalent soils in a catchment of the Bavarian Alps. European Journal of Forest Research, 128:609-620, 2009.

SHARMA, S.K.; MOHANTY, B.P.; ZHU, J.T. Including topography and vegetation attributes for developing pedotransfer functions. Soil Science Society of America Journal, 70:1430-1440, 2006.

SULEIMAN, A.A. & RITCHIE, J.T. Estimating saturated hydraulic conductivity from soil porosity. Transactions of the ASAE, 44:235-239, 2001.

TOMASELLA, J. & HODNETT, M.G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. Soil Science Society of America Journal, 163:190-202, 1998.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. & ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. Soil Science Society of America Journal, 64:327-338, 2000.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y.; CRESTANA, S. & RAWLS, W.J. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 67:1085-1092, 2003.

TOMASELLA, J. & HODNETT, M.G. Pedotransfer functions for tropical soils. In: Pachepsky, Y.A. & Rawls, W.J., ed. *Development of pedotransfer functions in soil hydrology*. Amsterdam, Elsevier, 2004. p. 415-429.

TOWNEND, J.; REEVE, M.J. & CARTER, A. Water release characteristic In: SMITH, K.A. *Soil and environmental analysis: Physical methods*. 2.ed. New York, Marcel Dekker Incorporated, 2000. p.95-140.

TYLER, S.W. & WHEATCRAFT, S.W. Fractal processes in soil-water retention. *Water Resources. Research*, 26:1047-1054, 1990.

VAN DAM, J.C.; HUYGEN, J.; WESSELING, J.G.; FEDDES, R.A.; KABAT, P.; van WALSUM, P.E.V.; GROENENDIJK, P. & VAN DIEPEN, C.A. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil Water Atmosphere Plant (SWAP) version 2.0, Theory., DLO Winand Staring Centre, Report 71. Department of Water Resources, Agricultural University, Wageningen; 1997. (Technical Document 45).

VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44:892-897, 1980.

VAN GENUCHTEN, M.Th.; SIMUNEK, J.; LEIJ, F.J. & SEJNA, M. RETC version 6.02. Disponível em: <<http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?retc-downloads>>. Acesso em 4 fev. 2015.

VAN LIER, Q.J. Disponibilidade de água as plantas. In: LIER, Q.J.V., ed. *Física do solo*. 1 ed. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2010. p.283-298.

VEREECKEN, H.; MAES, J.; FEYEN, J. & DARIUS, P. Estimating the soil-moisture retention characteristic from texture, bulk-density, and carbon content. *Soil Science*, 148:389-403, 1989.

VEREECKEN, H.; WEYNANTS, M.; JAVAUX, M.; PACHEPSKY, Y., SCHAAP, M.G. & van-GENUCHTEN, M.Th. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: a review. *Vadose Zone Journal*, 9:1-26, 2010.

WANG, G.; ZHANG, Y. & YUA, N. Prediction of soil water retention and available water of sandy soils using pedotransfer functions. *SciVerse Science Direct*, 37:49-53, 2012.

WEYNANTS, M.; VEREECKEN, H. & JAVAUX, M. Revisiting Vereecken pedotransfer functions: introducing a closed-form hydraulic model. *Vadose Zone Journal*. 8:86-95, 2009.

WÖSTEN, J.H.M.; FINKE, P.A. & JANSEN, M.J.W. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma*, 66:227-237, 1995.

WÖSTEN, J.H.M.; LILLY, A.; NEMES, A. & LE BAS, C. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90:169-185, 1999.

WÖSTEN, J.H.M.; PACHEPSKY, Y.A. & RAWLS, W.J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251:123-150, 2001.

XIANGSHENG, Y.; GUOSHENG, L. & YANYU, Y. Comparison of three methods to develop pedotransfer functions for the saturated water content and field water capacity in permafrost region. *Cold Regions Science and Technology* 88:10-16, 2013.

CAPÍTULO 2. VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO AMARELO

RESUMO

O conhecimento dos atributos físicos do solo e sua variabilidade espacial, em experimentos realizados no campo, exerce grande importância para o entendimento do comportamento da variável em estudo, deixando de se tratar a área em questão como homogênea. Neste contexto, teve-se como objetivo avaliar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo de uma parcela experimental contendo solo com textura arenosa, localizado no município de Piracicaba – SP, usando métodos geoestatísticos para análise dos dados. O estudo foi realizado na Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba-PR, a partir de dados coletados de uma área experimental da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ-USP), no município de Piracicaba-SP. Nessa área, estabeleceu-se uma parcela de 30 x 50 m, com espaçamento regular de 5 x 5 m, totalizando 60 pontos amostrais georeferenciados, com coleta de amostras de solos com a estrutura indeformada e deformada na camada de profundidade de 0,75-0,85 m. Os atributos físicos analisados foram: granulometria (areia, silte e argila), porosidade (total, macroporosidade, mesoporosidade e microporosidade), densidade do solo e das partículas e porosidade de aeração. Para analisar a variabilidade espacial, utilizou-se a geoestatística, por meio do critério da verossimilhança, na interpolação dos resultados por krigagem, gerando os mapas de variabilidade espacial das propriedades físicas do solo estudado. A dependência espacial ocorreu em todas as variáveis avaliadas, apresentando grau de dependência espacial moderado e forte. Houve correlação positiva significativa entre fração argila, microporosidade e densidade do solo, também entre a porosidade de aeração e mesoporosidade. Os modelos que melhor se ajustaram às variáveis areia, silte, argila, porosidade (total, macroporosidade, mesoporosidade e microporosidade), densidade do solo e das partículas e porosidade de aeração foram Wave, Spheric e Gauss, respectivamente. Os alcances práticos obtidos nas variáveis analisadas apresentaram valores maiores que a amostragem, com valor mínimo de 7 m e máximo de 22 m, respectivamente. Palavras-chave: manejo do solo, mapas temáticos, agricultura de precisão.

CHAPTER 2. SIMULATION OF SPATIAL VARIABILITY OF PHYSICAL ATTRIBUTES OF SOIL

ABSTRACT

Knowledge of soil physical properties and their spatial variability in experiments carried out on field, have great importance for the understanding of the variable of the study behavior, leaving the case to the study area as homogeneous. The objective of this work was to study the spatial variability of soil physical properties in an experimental plot using geostatistics. The study was performed in an experimental area of the College of Agriculture "Luiz de Queiroz" (ESALQ-USP), in Piracicaba city - SP. It was established a share of 30 x 50 m, with regular spacing of 5 x 5 m, totaling 60 georeferenced sampling points. Soil samples with undisturbed and disturbed structure in depth layer of 0,75 – 0,85 m were collected. The attributes were analyzed: particle size (sand, silt and clay), porosity (total, macro,mesoporosity and microporosity), soil bulk density and soil particle density, air filled pores. For spatial variability, it was used geostatistics, by the criterion of likelihood, the results interpolation by kriging, generating the spatial variability maps of soil physical attributes studied. Spatial dependence occurred in all variables, with degree from moderate to strong spatial dependence. There was a significant positive correlation for clay, microporosity and bulk density, and for air filled pores and mesoporosity. The models that fitted to variables the sand, silt, clay, porosity (total, macro, mesoporosity and microporosity), soil bulk density and soil particle density, air filled pores were Wave, Spheric and Gauss respectively. The practical achievements obtained at the variables analyzed were higher than the sampling, with a minimum of 7 m and maximum 22 m, respectively.

Key-Words: Soil management, thematic maps, precision agriculture.

2.3. INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente cresce cada vez mais e com ela, a necessidade de estudos que visem planejamento conservacionista, otimizando os recursos naturais, atenuando os impactos das atividades antrópicas. Kitamura et al. (2007) destacam que o conhecimento das propriedades físicas do solo permite o entendimento do fluxo superficial e movimento de fluidos no solo, sendo fundamental para o planejamento ambiental.

A adequada descrição da dependência espacial de determinada variável do solo é fundamental na avaliação do comportamento e variação da continuidade espacial na matriz do solo. Nesse aspecto, o entendimento das propriedades que se correlacionam diretamente com o espaço poroso do solo tornam-se muito importante, principalmente pela ação direta no desenvolvimento do sistema radicular das plantas e deslocamento de fluidos no espaço poroso.

Experimentos de campo, em sua maioria, consideraram essas áreas uniformes quanto as suas propriedades, mesmo em pequenas áreas, pode-se interpretar erroneamente as respostas obtidas às questões existentes, pois a hipótese de ocorrência de dependência espacial estará sendo desprezada, considerando a área homogênea (Grego & Vieira, 2005). Em áreas experimentais onde o solo é considerado como homogênea alguma propriedade do solo pode apresentar variação no espaço e no tempo, proporcionando resultados diversos ao tratamento, sendo declarados como efeitos dos fatores não controlados (Brito et al., 2011).

A dependência espacial pode ser quantificada por semivariogramas, demonstrando o grau de dissimilaridade entre pares de medidas em razão da distância e orientação da linha entre dois locais de amostragem (Olea, 2006). Assim, por meio da análise geoestatística obtêm-se a estrutura de dependência espacial dos pontos amostrados e a construção de mapas temáticos de cada atributo da área, possibilitando a aplicação localizada de corretivos, considerando a necessidade em cada talhão (Girardello et al., 2011).

As informações fornecidas com a aplicação das ferramentas geoestatísticas no estudo da variabilidade espacial devem possibilitar, portanto, o conhecimento da magnitude da participação de certas propriedades do solo e outros estudos. Seidel & Oliveira (2014), descrevem que a utilização do semivariograma para avaliação da dependência espacial é a principal ferramenta utilizada na geoestatística, que consiste em um gráfico que associando distâncias com semivariâncias, além de ser o ponto chave na determinação do preditor geoestatístico (krigagem).

Vários estudos utilizando ferramentas da geoestatística na avaliação das propriedades físicas e hidráulicas do solo são destacadas por diversos autores. Dentre eles, Kitamura et al. (2007) analisaram a variabilidade e caracterizaram a dependência espacial da granulometria do solo associando com a produtividade de grãos do feijoeiro. A variabilidade espacial das propriedades do solo influenciou de forma decisiva o manejo a ser adotado nas áreas cultivadas, sendo importante para realizar o manejo adequado.

Siqueira et al. (2009) avaliaram a densidade e porosidade do solo sob semeadura direta, em um período de vinte anos. Observou-se alta dependência espacial, concluindo que o manejo do solo com semeadura direta influenciou favoravelmente a variabilidade espacial das propriedades físicas do solo após vinte anos de manejo.

Em solos do bioma Cerrado, Cavalcante et al. (2011) estudaram a variabilidade espacial da resistência à penetração radicular, utilizando malha regular. Os autores verificaram que a resistência à penetração foi influenciada pelo manejo do solo (plantio direto e convencional). Os modelos teóricos de semivariograma que melhor se ajustaram dependeram da profundidade da amostragem. Segundo Grego & Vieira (2005) solos manejados por diferentes preparos são alterados em profundidade, sendo um fator importante no estudo de dependência espacial (DE), devido os processos que ocorreram nas camadas superficiais e sub-superficiais. Como exemplo, tem-se a infiltração, redistribuição e retenção da água em todo perfil do solo, além do desenvolvimento radicular nas camadas sub-superficiais.

Kamimura et al. (2013) avaliaram e identificaram as estruturas de dependência espacial em um Latossolo sob lavoura cafeeira, identificando a camada com maior impedimento físico. A técnica de krigagem ordinária demonstrou ser alternativa viável para a estimativa de dados em pontos não amostrados na área experimental, uma vez que, a interpolação é um estimador não tendencioso e variância mínima, possibilitando o desenvolvimento de mapas das variáveis analisadas.

O estudo das interrelações das propriedades do solo com os resultados da produtividade possibilita delimitar áreas com maiores e menores produções. Sana et al. (2014) avaliaram a correlação dos dois fatores em áreas de produção de algodão, as quais foram tratadas com ferramentas de agricultura de precisão. O estudo da variabilidade espacial das propriedades do solo possibilitou a delimitação das zonas homogêneas.

Molin & Rabelo (2011) relataram que a utilização de mapas de produtividade está dentre as principais ferramentas utilizadas para identificação dos fatores que afetam o desenvolvimento das culturas. Tais mapas são utilizados na agricultura de precisão como alternativa moderna visando o gerenciamento da variabilidade espacial e temporal de lavouras, orientando práticas de manejo. Por essa razão, a caracterização da variabilidade espacial é essencial para um entender melhor as inter-relações das propriedades do solo e manejo da água.

Neste contexto, teve-se como objetivo avaliar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo com textura arenosa, em uma parcela experimental sob pousio localizada no município de Piracicaba – SP.

2.4. MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Conforme triângulo textural da Sociedade Brasileira de Ciências do Solo (SBCS) o solo utilizado no estudo foi classificado, como textura arenosa, com variação entre as classes em Areia-Franca e Franco-Arenosa. Uma malha de 30 x 50, com 60 pontos amostrais espaçados em 5 m entre si, conforme ilustrado na (Figura 1). Foram obtidos a partir de um conjunto de dados regionalizados por Brito (2010), coletados em área de pousio com vegetação espontânea há quatro anos, localizado no município de Piracicaba-SP.

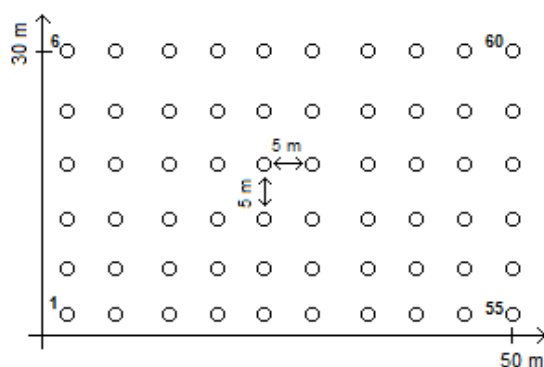


Figura 1. Croqui da área experimental com espaçamento regular dos 60 pontos amostrais de um solo com textura arenosa sob pousio.

A área experimental encontra-se nas coordenadas geográficas à 22°42'43" S, 47 °37'10" W com 591 m de altitude, apresentando relevo com baixa declividade e pequenas oscilações, com diferença de 0,765 m entre a menor e maior cota.

Para determinação dos atributos físicos do solo foram retiradas amostras com e sem estrutura preservada, para todos os pontos amostrais, na camada entre 0,75-0,85 m de profundidade.

2.4.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E DENSIDADES DO SOLO E DAS PARTÍCULAS

Amostras de solo com estrutura deformada foram secar ao ar e posteriormente destorroado e peneirado em malha de 2 mm de abertura. A análise granulométrica das amostras seguiu a metodologia de *Methods of Soil Analyses*, mediante o uso da combinação de processo químico, desagregação mecânica, e quantificação das frações silte e argila, utilizando o método da pipeta (Gee & Or, 2002).

A densidade do solo (ρ_s) foi obtida conforme Pires (2011), para os 60 pontos amostrais, coletando-se amostras de solo indeformadas em cilindros volumétricos, com o auxílio de um extrator tipo Uhland. A determinação foi obtida fazendo-se a relação entre massa seca do solo (m_s) e o volume de solo das amostras não deformadas (V_t), valendo-se da expressão ($\rho_s = m_s/V_t$).

A densidade das partículas (ρ_p) foi determinada utilizando a metodologia do deslocamento de gás (Flint & Flint, 2002) e o picnômetro a gás, modelo ACCUPIC 1330 (Micromeritics Instrument Corporation).

2.4.3. DISTRIBUIÇÃO DA POROSIDADE E DA POROSIDADE DE AERAÇÃO DA MATRIZ DO SOLO

Os valores de porosidade total (α) nos 60 pontos amostrais do solo arenoso foram determinados considerando-os em igualdade com a umidade volumétrica do solo na saturação ($\alpha = \theta_s$). Avaliou-se também a subdivisão da α em macroporosidade, mesoporosidade e microporosidade, fazendo-se a razão entre ($\theta/|\psi_m|$), a qual corresponde à fração do volume de poros ocupado pela água em dada tensão. Maiores detalhes podem ser observados no trabalho de Brito (2010).

A porosidade de aeração (α_{ar}) foi fixada e quantificada por meio da expressão ($\alpha_{ar} = \theta_s - \theta_{cc}$). O conceito estabelece a capacidade máxima do solo em disponibilizar ar quando estiver na capacidade de campo (θ_{cc}). A θ_{cc} foi determinada seguindo o critério da taxa de drenagem desprezível, ou seja, ($d\theta/dt \rightarrow 0$), (Prevedello, 1999; Armindo, 2013).

2.4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA E GEOESTATÍSTICA

Na análise exploratória dos dados, utilizou-se métodos da estatística clássica com o auxílio do *software* R (*DEVELOPMENT CORE TEAM*, 2014), calculando medidas de tendência (média, mediana, moda, mínimo, máximo), dispersão (amplitude, desvio padrão, variância, coeficiente de variação) e distribuição (assimetria e curtose).

A análise da variabilidade espacial foi realizada com o auxílio do *software* R (*DEVELOPMENT CORE TEAM*, 2014), utilizando o pacote *geoR* (Ribeiro Junior & Diggle, 2001) para avaliar a disposição dos dados nos seus locais de medida, o semivariograma como ferramenta para avaliar a dependência espacial, e a krigagem para a interpolação dos dados em locais não amostrados.

2.4.4.1. Semivariograma

Com o semivariograma avaliou-se a dependência espacial (DE), permitindo o cálculo dos parâmetros envolvidos no modelo (Figura 2).

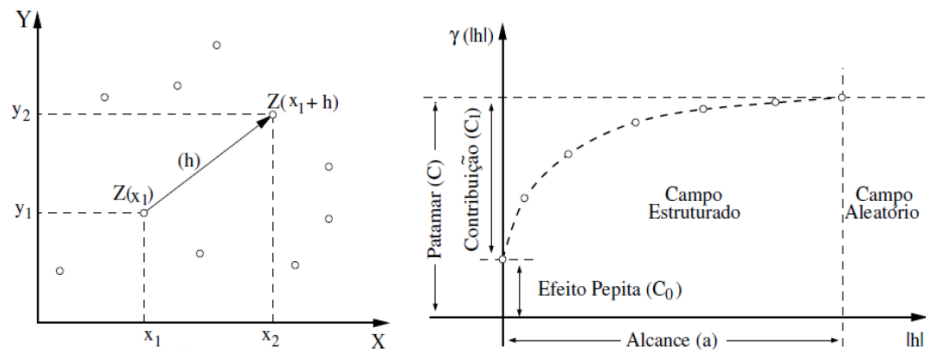


Figura 2. Indicação dos parâmetros do semivariograma. Fonte: Camargo et al. (2004).

Com a obtenção do semivariograma, avaliou-se o alcance (a) máximo da DE; efeito pepita (C_0), representando o valor da semivariância a distância zero; contribuição (C_1) intervalo no qual o semivariograma cresce, havendo DE, e o patamar (C) representando a altura na qual o semivariograma se estabiliza (Seidel & Oliveira, 2014). Na eq. (1) é apresentado o estimador da função semivariância para variáveis regionalizadas:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (1)$$

em que: $\gamma(h)$: semivariância estimada; $N(h)$: número de pares observados separados por uma distância h ; $Z(x_i)$: valor em cada ponto; $Z(x_i+h)$: valor em cada ponto mais a distância h .

2.4.4.2. Modelos de Semivariograma

Os modelos de semivariograma utilizado foram: Esférico – *Spheric* eq.(2); Exponencial – *Exp* eq.(3); Gaussiano – *Gauss* eq.(4); Onda – *Wave* eq.(5); e, Matérn – *Mat* eq.(6) com *Kappa* (1,5), disponíveis na função “*likfit*” da *geoR*. Para a função Matérn foi considerada a relação entre o alcance prático e o parâmetro de escala ϕ que depende do *kappa*, com alcances práticos dados por 3ϕ , $4,75\phi$ e $5,92\phi$ para *kappa* igual a 0,5; 1,5; e 2,5, respectivamente (Diggle & Ribeiro Junior, 2007).

$$\gamma(h) = 1 - 1,5 \left(\frac{h}{\phi} \right) + 0,5 \left(\frac{h}{\phi} \right)^3 \quad (2)$$

$$\gamma(h) = \exp \left(-\frac{h}{\phi} \right) \quad (3)$$

$$\gamma(h) = \exp \left[\left(-\frac{h}{\phi} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$\gamma(h) = \frac{\phi}{h} \text{sen} \left(\frac{h}{\phi} \right) \quad (5)$$

$$\gamma(h) = \left[\frac{1}{2^{k-1} \Gamma} \left(\frac{\phi}{h} \right)^k S_k \left(\frac{h}{\phi} \right) \right] \quad (6)$$

em que: $\gamma(h)$: correlação entre pares de pontos separados pela distância h ; ϕ : parâmetro de alcance teórico do modelo; h : distância entre os pontos; S : parâmetro ordem que determina a suavidade do processo; $\Gamma(k)$: função Gama; S_k : função Bessel modificada de terceiro tipo de ordem k .

2.4.4.3. Métodos de Ajuste

Para avaliação dos modelos que melhor representam as variáveis estudadas e suas dependências espaciais, utilizou-se o critério da Máxima Verossimilhança (MV) Seidel & Oliveira (2014), a partir dos modelos avaliados.

A maximização da eq. (7) é obtida por procedimentos numéricos iterativos, na qual a matriz de covariância é atualizada e invertida a cada iteração (Ribeiro Junior & Diggle, 2001). Logo, a função de verossimilhança a ser maximizada tem a seguinte forma:

$$L(\beta, \theta) = \left\{ -\frac{1}{2} \left\{ \log |K| + (Z - F\beta)^t [K]^{-1} (Z - F\beta) \right\} \right\} \quad (7)$$

em que: $L(\beta, \theta)$: função de verossimilhança a ser maximizada; F : matriz com os valores das funções; β : vetor de parâmetros do modelo linear; Z : continuidade espacial aleatória à variável; K : $(\tau^2 I + \sigma^2 \Sigma)$; τ^2 : efeito pepita; σ^2 : contribuição; I : matriz de identidade; Σ : matriz de covariâncias baseada no modelo de dependência espacial.

2.4.4.4. Seleção de Modelos

A avaliação do desempenho dos modelos na estimativa da dependência espacial para as propriedades do solo, foi realizada por dois critérios. No primeiro, os máximos valores de verossimilhança foram considerados e, no segundo, a avaliação foi realizada a partir do menor valor de *akaike information criterion* (AIC). Em caso de empate, o maior valor de *bayesian information criterion* (BIC), gerado para cada modelo dentro dos respectivos métodos de ajuste, pela seguintes expressões:

$$AIC = -2 \log L + 2P \quad (8)$$

$$BIC = -2 \log L + P [\log(n)] \quad (9)$$

em que: L : verossimilhança maximizada do modelo avaliado; P : número de parâmetros desse modelo; n : número de dados.

2.4.4.5. Krigagem

A partir da existência de DE, aplicou-se a técnica da krigagem ordinária nas estimativas para pontos não observados, gerando-se mapas de variabilidade espacial dos atributos físicos do solo. A correlação espacial existente entre as simulações e os valores observados foi determinada identificando áreas homogêneas dentro do grid amostral, obtida pela expressão:

$$\bar{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \omega_i Z(x_i) \quad (10)$$

em que: $\bar{Z}(x_0)$: valores estimados da variável em estudo; (x_0) : ponto a ser estimado, N : número de vizinhos utilizado na estimativa $\bar{Z}(x_0)$; ω_i : pesos ponderados associados a cada valor medido de $\bar{Z}(x_0)$.

Segundo Andrade et al (2005), essa é uma técnica de interpolação não tendenciosa, que possui variância mínima, sendo cada estimativa obtida pelo cálculo da média ponderada de um conjunto de observações ao redor de uma vizinhança, em que a estimativa $\bar{Z}(X_0)$ associada à posição (X_0).

2.4.4.6. Grau de Dependência Espacial

Na análise do grau de dependência espacial das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que valores de $[(C_0/(C_0+C_1))]$ menores que 25% são considerados dependência espacial forte, valores de $[(C_0/(C_0+C_1))]$ entre 25 e 75% indicam dependência espacial moderada e valores de $[(C_0/(C_0+C_1))]$ maiores que 75% determinam dependência espacial fraca.

2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.5.1. ESTATÍSTICA DESCRITIVA

A análise com a estatística descritiva dos atributos físicos para os 60 pontos amostrais são apresentadas na (Tabela 1). Observou-se que os valores médios e medianos de todos os atributos físicos ficaram próximos entre si, evidenciando uma distribuição normal, porém, a fração argila e mesoporosidade demonstraram certa assimetria à direita na distribuição dos valores, como apresentado na (Figura 3 e 4).

Tabela 1. Estatística descritiva para fração granulométrica (areia, silte e argila), densidade do solo (ρ_s), porosidade total (α), macroporosidade (Macro), mesoporosidade (Meso), microporosidade (Micro) e porosidade de aeração (α_{ar}).

Parâmetro Estatístico	Areia	Silte	Argila	ρ_s	α	Macro	Meso	Micro	α_{ar}
	-----%	-----%	-----%	(kg m ⁻³)	-----%	-----%	-----%	-----%	-----%
Média	74,39	6,100	19,50	1508	43,77	23,82	28,56	47,43	18,67
Mediana	74,40	6,005	19,51	1509	43,82	24,04	29,89	47,17	19,07
Máximo	76,55	7,780	20,90	1591	47,81	32,41	37,37	59,39	24,08
Mínimo	72,78	5,380	17,09	1452	39,71	16,01	16,55	38,45	13,17
DP	0,737	0,461	0,781	30,62	1,487	2,913	5,080	4,183	2,342
CV	0,990	7,552	4,003	2,029	3,396	12,23	17,79	8,819	14,04
1º Q	74,02	5,790	19,19	1484	42,80	21,79	24,71	44,67	17,12
3º Q	74,68	6,340	19,90	1529	44,76	25,69	32,76	49,95	20,21
Assimetria	0,573	0,986	-0,900	0,379	0,043	0,007	-0,497	0,427	-0,161
Curtose	1,025	1,318	1,643	-0,327	0,258	0,235	-0,645	0,037	-0,062

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; 1º Q: primeiro quartil; 3º Q: terceiro quartil.

Resultados similares foram encontrados por Simões et al. (2006) e Oliveira et al. (2013), avaliando a variabilidade dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico e Cambissolo Háplico, com amostras de solos coletadas nas camadas de 0 a 0,20 m de profundidade.

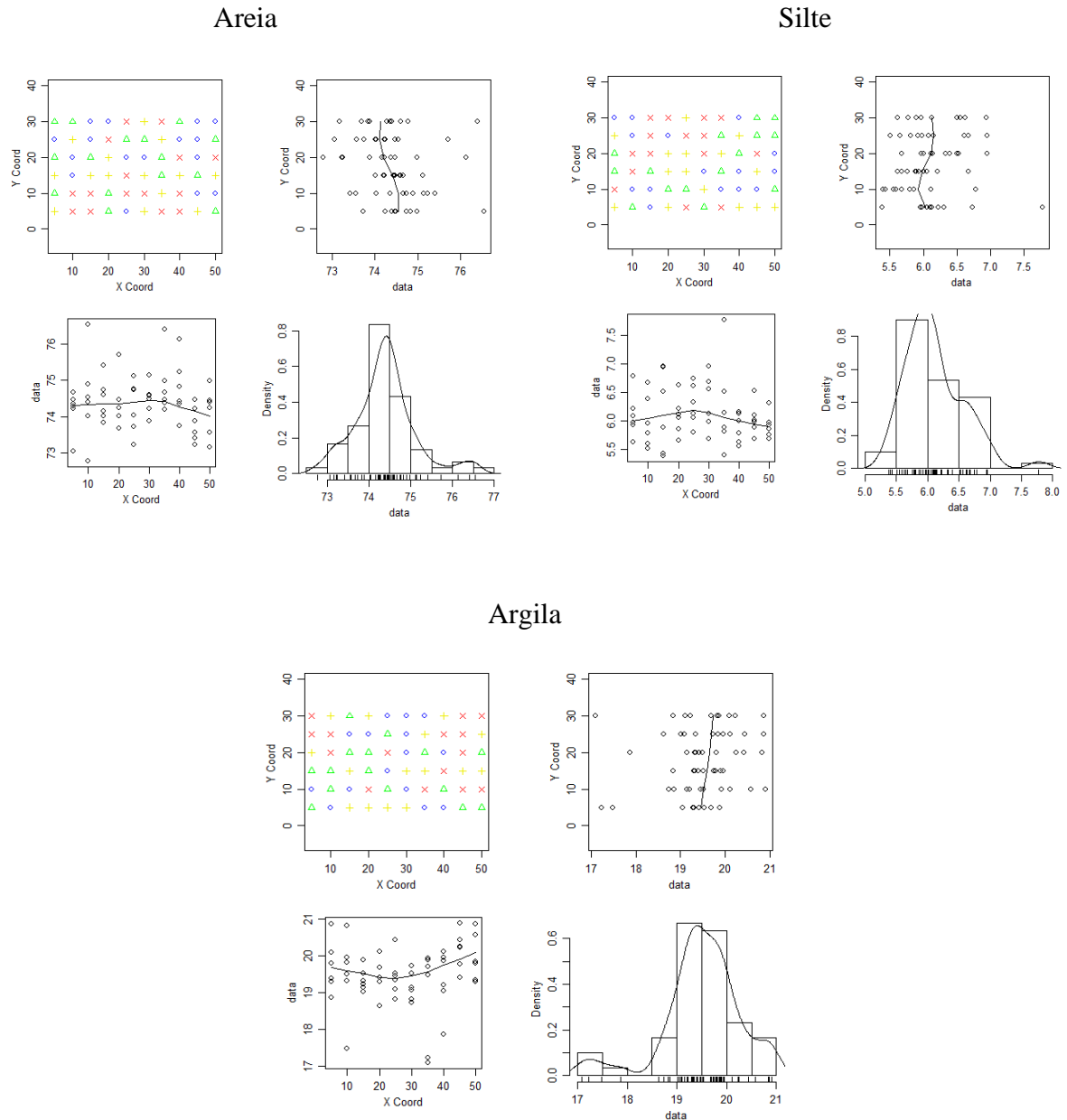


Figura 3. Gráficos de distribuição dos valores de areia, silte e argila nos locais de medida (superior-esquerdo), relação dos dados com os eixos da área experimental (superior- direito e inferior-esquerdo) e histograma da densidade de probabilidade (inferior-direito) para os 60 pontos amostrais.

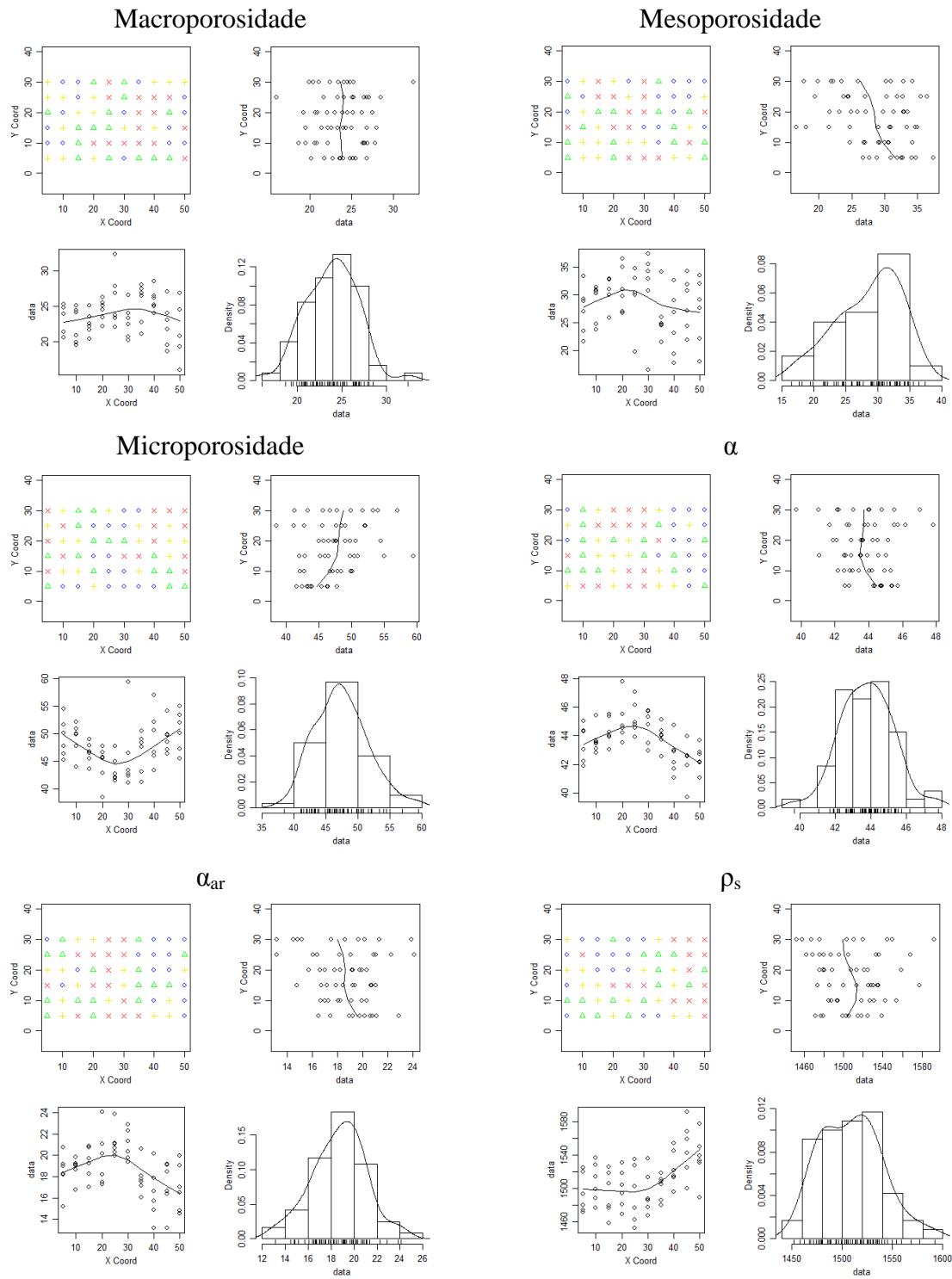


Figura 4. Gráficos de distribuição dos valores de macroporosidade, mesoporosidade, microporosidade, porosidade total (α), porosidade de aeração (α_{ar}), densidade do solo (ρ_s) nos locais de medida (superior-esquerdo), relação dos dados com os eixos da área experimental (superior-direito e inferior-esquerdo) e histograma da densidade de probabilidade (inferior-direito) para os 60 pontos amostrais.

Andrade et al. (2005) avaliaram a variabilidade espacial da densidade do solo, em uma área experimental para irrigação. As amostras foram retiradas nas camadas de 0-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-0,90 m de profundidade. Segundo os autores, os valores médios foram semelhantes nas três profundidades analisadas, indicando ausência de variação espacial com aumento da profundidade.

Todas as variáveis avaliadas apresentaram valores baixos de DP, CV, assimetria e curtose (Tabela 1), indicando distribuição normal entre os 60 pontos amostrais, uma vez que valores de assimetria e curtose entre 0 e 3 indicam a distribuição normal dos dados (Grego & Vieira, 2005). A mesma tendência foi encontrado por Simões et al. (2006); Lima et al. (2007); Siqueira et al. (2009), em Latossolo Vermelho, apresentando normalidade para granulometria, em áreas cultivadas com pastagem, vegetação natural e semeadura direta.

2.5.2. VARIABILIDADE ESPACIAL

Ao observar a análise geoestatística dos atributos físicos do solo (Tabela 2), nota-se que todas as variáveis analisadas apresentaram DE, sendo ajustadas aos modelos de semivariogramas (Figura 5). Apresentando alcance superior ao espaçamento da amostragem, com valor mínimo de 7 m e máximo de 22 m.

Tabela 2. Modelos geoestatísticos ajustados e seus índices de estimativa aos valores da fração granulométrica (areia, silte e argila), densidade do solo (ρ_s), porosidade total (α), macroporosidade (Macro), mesoporosidade (Meso), microporosidade (Micro) e porosidade de aeração (α_{ar}).

Parâmetro Estatístico	Areia	Silte	Argila	ρ_s	α	Macro	Meso	Micro	α_{ar}
Modelo	Wave	Spheric	Spheric	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Wave	Wave
C_0	0,430	0,0001	7,970	497,7	0,856	0,0000	13,07	11,98	2,149
C_1	0,103	0,0001	3,686	491,8	1,561	8,690	12,51	5,391	3,961
C	0,533	0,0002	11,66	989,5	2,418	8,690	25,58	17,37	6,110
GDE	0,806	0,500	0,684	0,503	0,354	0,000	0,511	0,691	0,352
a (m)	7,687	11,75	14,52	22,18	21,68	7,324	9,796	18,05	13,65
VER	-66,30	-34,25	-68,24	-281,9	-95,02	-146,5	-179,7	-165,4	-122,2
AIC	136,6	76,50	144,5	571,8	198,0	301,1	367,5	338,8	252,4
BIC	140,8	84,87	152,9	580,1	206,4	309,5	375,9	347,2	260,7

C0: efeito pepita; C1: variância; C: patamar, C0+C1; GDE: grau de dependência espacial, C0/(C0+C1); a: alcance; VER: verossimilhança; AIC: *akaike information criterion*; BIC: *bayesian information criterion*;

Segundo Seidel & Oliveira (2014), o alcance marca a distância a partir da qual as amostras tornam-se independentes, sendo um parâmetro fundamental para avaliações de experimentos e planejamento ambiental, inferindo sobre a dependência espacial da variável em estudo.

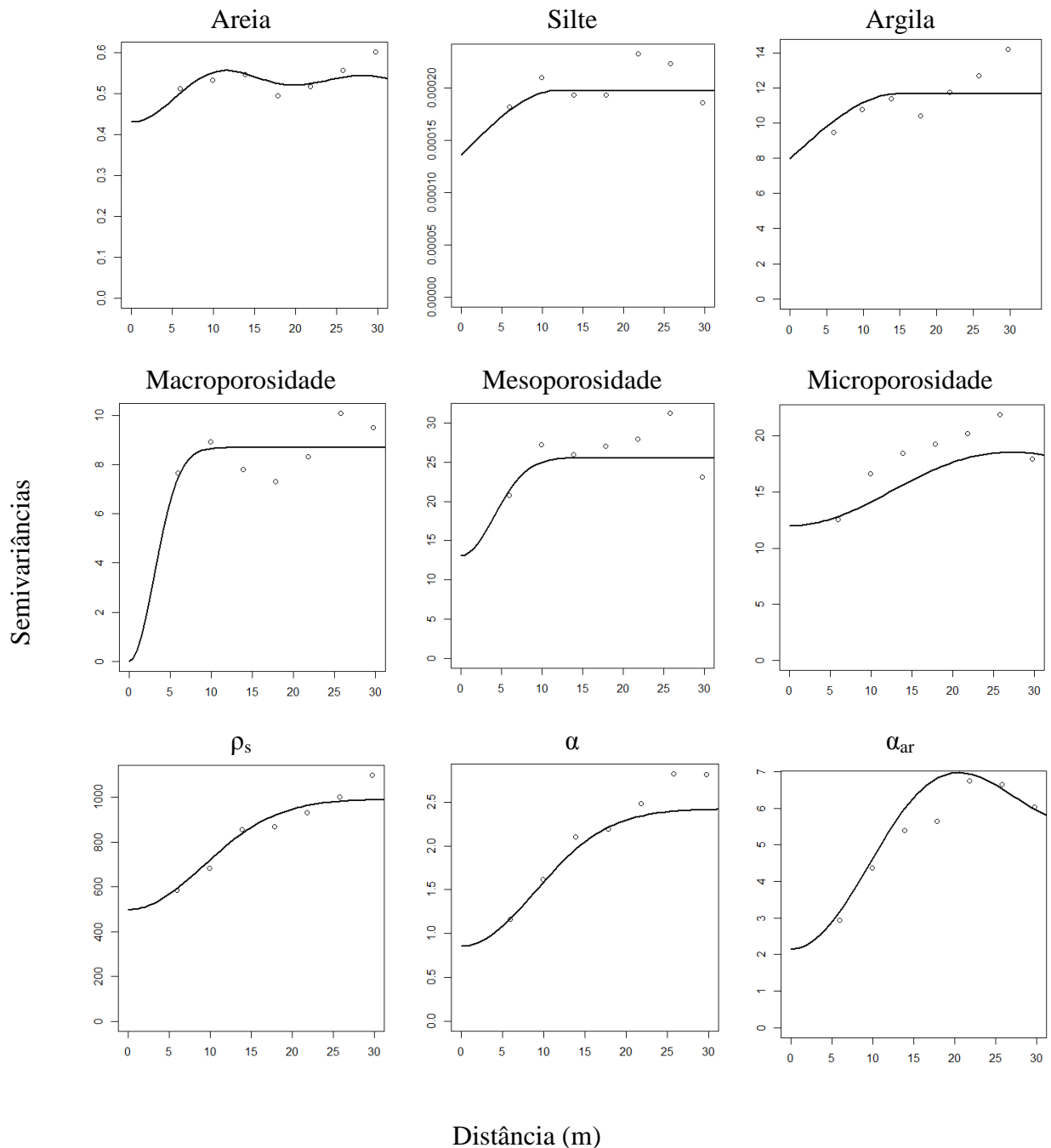


Figura 5. Semivariogramas ajustados para os atributos físicos do solo, granulometria (areia, silte e argila), macroporosidade, mesoporosidade, microporosidade, densidade do solo (ρ_s), porosidade total (α), porosidade de aeração (α_{ar}).

Na (Figura 5) estão apresentados os semivariogramas ajustados aos modelos teóricos que melhor descreveram o comportamento da variabilidade espacial das variáveis em estudos. Nota-se uma aleatoriedade dos parâmetros dos semivariogramas, com valores do efeito pepita similares ao patamar, caracterizando valores altos da semivariância estimada. O modelo esférico de semivariograma ajustou-se melhor na determinação da DE da fração silte e argila, similar ao encontrado na maioria dos trabalhos em ciência do solo. O modelo Gaussiano e Wave apresentaram melhores ajustes para os demais atributos.

Constatou-se que o grau de DE predominante nas variáveis analisadas foi considerado moderado, conforme a classificação de Cambardella et al. (1994). Os resultados são, semelhantes aos encontrados por Grego & Vieira (2005) e Siqueira et al. (2009) em Latossolo Vermelho.

A correlação de Pearson para cada variável analisada (Tabela 3), evidenciou que a fração argila tem correlação positiva com a densidade do solo e a microporosidade. A microporosidade é responsável pela retenção de água no solo e está interligada com a fração menor da textura. Grego et al. (2005) descreveram que o solo argiloso naturalmente apresenta maior capacidade de reter água, graças à microporosidade e maior agregação existente.

A α_{ar} apresentou 72% de correlação com a mesoporosidade, responsável pela redistribuição dos fluidos no perfil do solo. Os resultados indicam que a θ_{cc} está mais atrelada a microporidade, do que a mesoporidade, uma vez que a microporosidade apresenta alta correlação com a retenção de água no solo, corroborando com os resultados obtidos por Andrade & Stone (2011).

Tabela 3. Valores da correlação de Pearson para os mapas da granulometria (areia, silte e argila), densidade do solo (ρ_s), porosidade total (α), macroporosidade (Macro), mesoporosidade (Meso), microporosidade (Micro) e porosidade de aeração (α_{ar}).

Variável	Areia	Silte	Argila	ρ_s	α	Macro	Meso	Micro	α_{ar}
Areia	1	-0,159	-0,727	-0,176	0,205	0,096	0,124	-0,244	0,156
Silte	-0,159	1	-0,441	-0,494	0,449	-0,084	0,357	-0,378	0,431
Argila	-0,727	-0,441	1	0,542	-0,586	-0,073	-0,374	0,611	-0,506
ρ_s	-0,176	-0,494	0,542	1	-0,858	-0,062	-0,441	0,626	-0,774
α	0,205	0,449	-0,586	-0,858	1	0,121	0,591	-0,833	0,911
Macro	0,096	-0,084	-0,073	-0,062	0,121	1	-0,477	-0,015	-0,095
Meso	0,124	0,357	-0,374	-0,441	0,591	-0,477	1	-0,593	0,718
Micro	-0,244	-0,378	0,611	0,626	-0,833	-0,015	-0,593	1	-0,749
α_{ar}	0,156	0,431	-0,506	-0,774	0,911	-0,095	0,718	-0,749	1

2.5.3. KRIGAGEM

As informações obtidas nos mapas de krigagem (Figuras 6, 7, 8), após a análise de DE, foram mais completas que a simples apresentação dos semivariogramas.

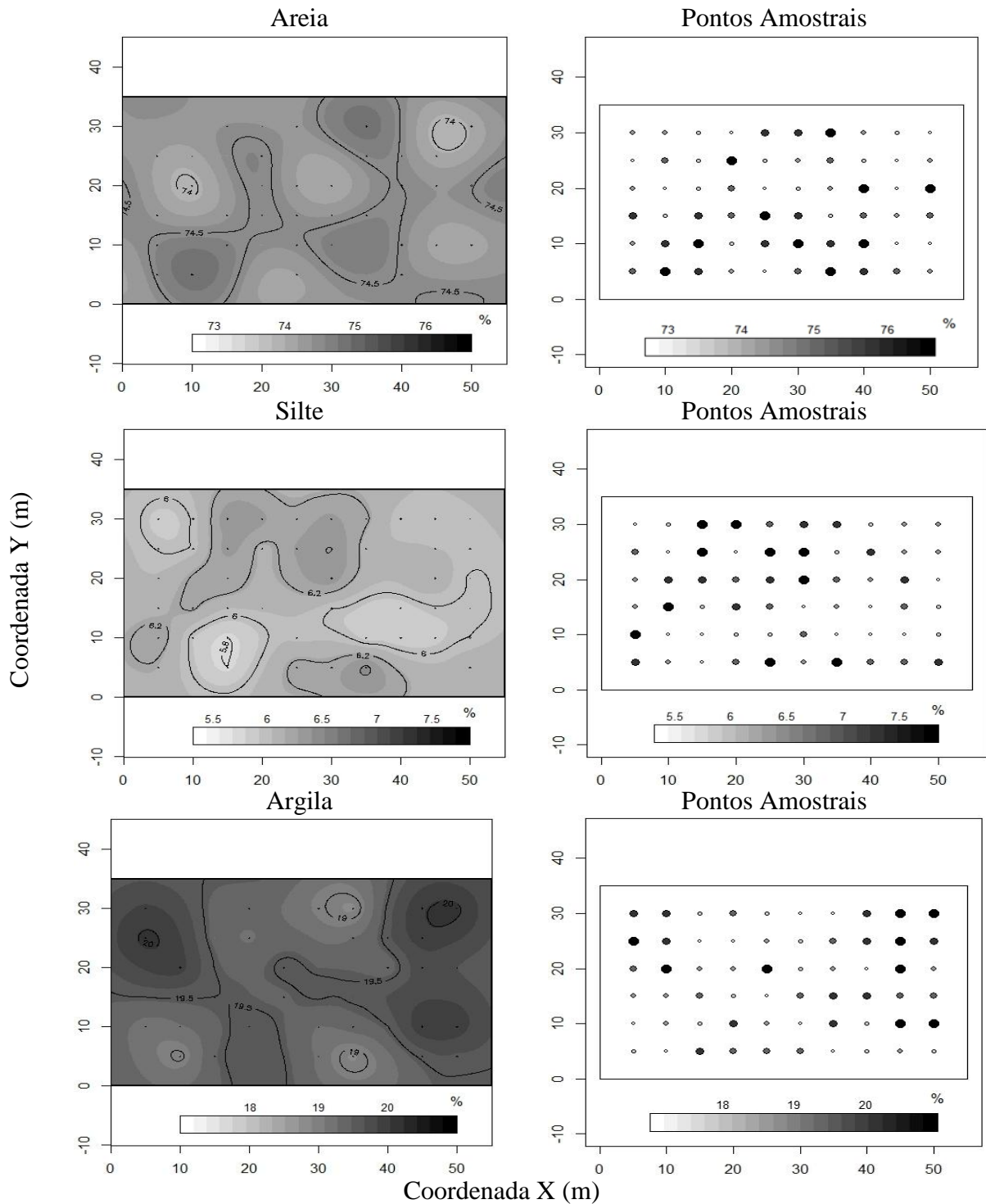


Figura 6. Mapas de krigagem da variabilidade espacial (esquerdo) e distribuição dos valores (direito) para a granulometria (areia, silte e argila) nos 60 pontos amostrais.

Para cada área e variável, a variabilidade apresentou distribuição espacial diferenciada, como pode ser observado por meio de análise das isolinhas.

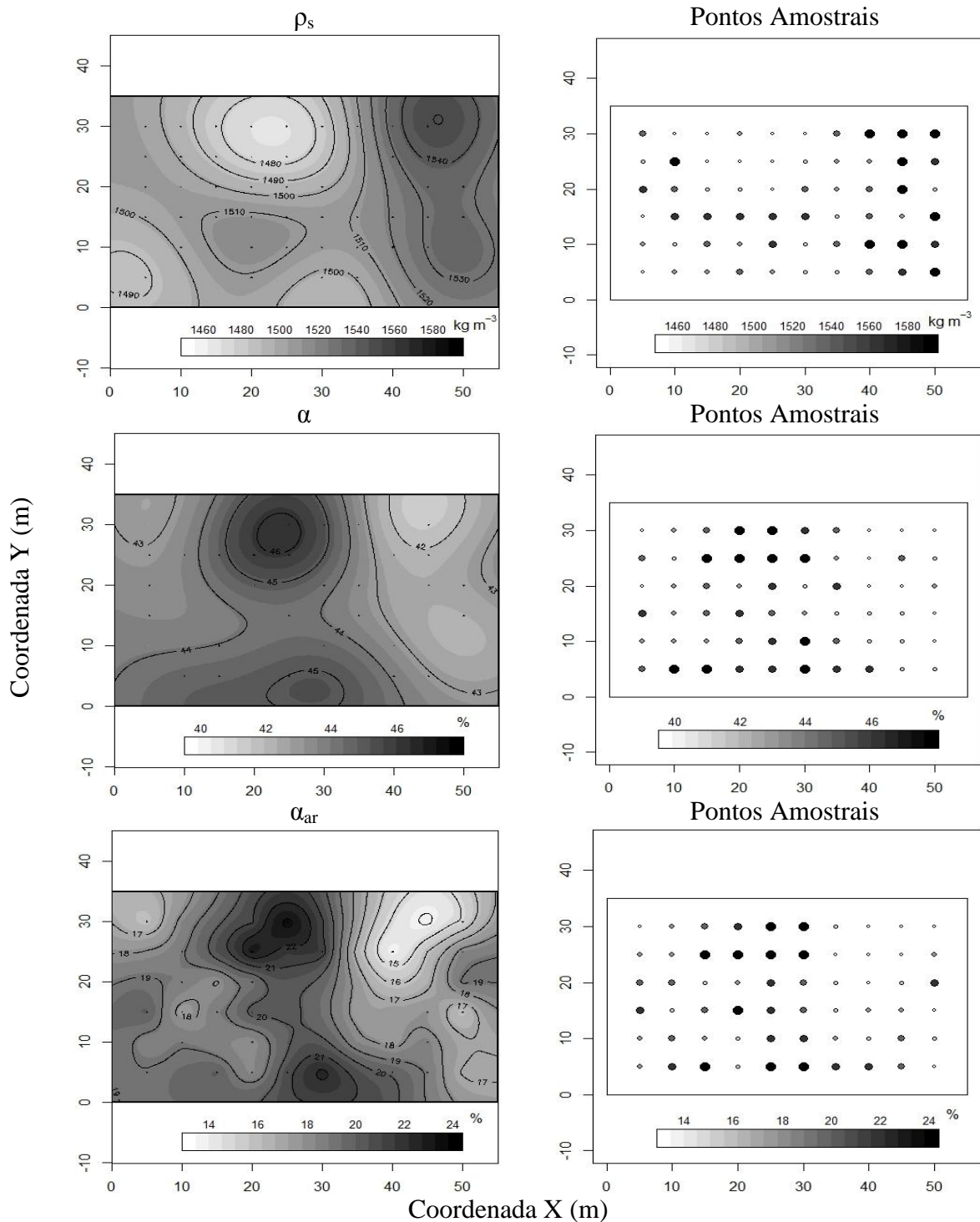


Figura 7. Mapas de krigagem variabilidade espacial (esquerdo) e distribuição dos valores (direito) para a densidade do solo (ρ_s), porosidade total (α), porosidade de aeração (α_{ar}) nos 60 pontos amostrais.

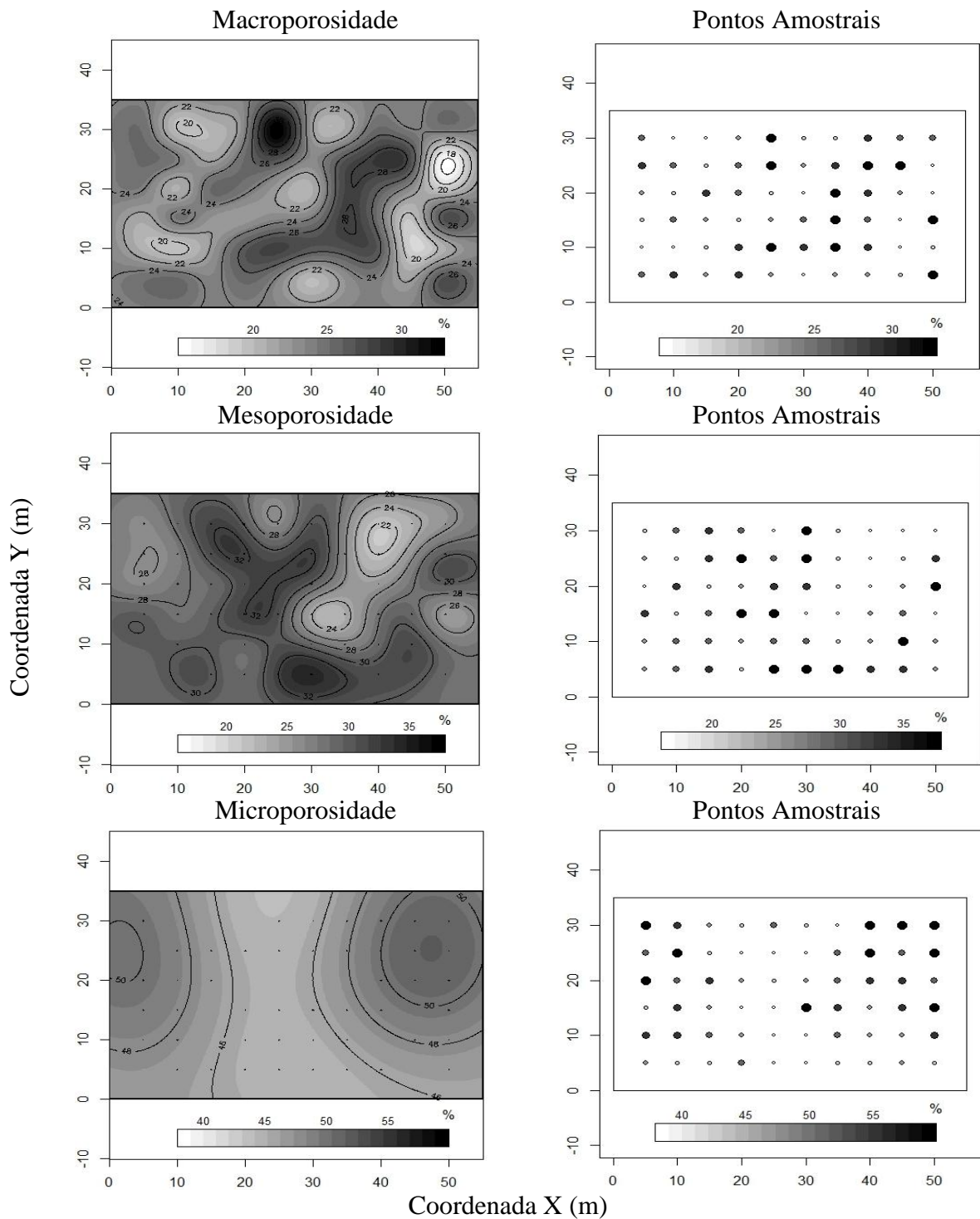


Figura 8. Mapas de krigagem variabilidade espacial (esquerdo) e distribuição dos valores (direito) para a macroporosidade, mesoporosidade e microporosidade nos 60 pontos amostrais.

A partir dos mapas apresentados, tornou-se possível avaliar separadamente a distribuição das variáveis em estudo, deixando de se tratar a área como homogênea, auxiliando ainda na fase de elaboração de projetos ou aqueles já instalados, o que permite um

planejamento adequado do manejo do solo. Os resultados são importantes para o planejamento experimental da área estudada, assim como na determinação do número de pontos que devem ser amostrados para atingir melhor representatividade (Souza et al., 2001).

Acrescenta Grego et al. (2005) que a DE das variáveis, bem como a semelhança de comportamento entre elas, sugere que se analise a variabilidade espacial dos atributos do solo em conjunto, antes de adotar um delineamento experimental ao acaso, visto que qualquer tratamento adotado nesta parcela que necessite da homogeneidade levará a falsos resultados.

2.6. CONCLUSÕES

A amostragem de 5 m x 5 m foi suficiente na identificação da variabilidade espacial da granulometria, densidades do solo e das partículas, porosidade total, macroporosidade, mesoporidade, microporosidade e porosidade de aeração, que apresentaram alcances práticos, com valor mínimo de 7 m e máximo de 22 m.

A dependência espacial encontrada para as variáveis estudadas, bem como a semelhança de comportamento entre elas, permite inferir que amostragem ao acaso resultaria em interpretações errôneas.

Com a análise geoestatística, detectou-se a variabilidade espacial de todos os atributos físicos analisados, elaborando, pela técnica da Krigagem, mapas temáticos que podem auxiliar o planejamento experimental da área estudada.

2.7. LITERATURA CITADA

ANDRADE, A.R.S.; GUERRINI, I.A.; GARCIA, C.J.B.; KATEZ, I. & GUERRA, H.O.C. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. *Ciência Agrotecnologia*, 29:322-329, 2005.

ANDRADE, A.R.S. & STONE, L.F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 15:111-116, 2011.

ARMINDO, R.A. Índices baseados no modelo de van Genuchten como indicadores da qualidade física do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Florianópolis, 2013. Anais. Florianópolis, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

BRITO, A. S.; LIBARDI, P.L.; MOTA, J.C.A.; MORAES, S.O. estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 35:1939-1948, 2011.

CAMARGO, E. C.G.; FUCKS, S.D.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V., ed. Análise espacial de dados geográficos. 2 ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p.79-122.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of American Journal, 58:1501-1511, 1994.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M. & PEREIRA, G. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 15:237-243, 2011.

FLINT, A.L.; FLINT, L.E. Particle-size analysis. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C (Ed). Methods of soil analysis: Physical methods. Madison: American Society of Agronomy, 2002. p. 235-240.

KOOREVAAR, P.; MENELIK, G.; DIRKSEN, C. Elements of soil physics. Developments in Soil Science, 1983, vol. 13. Elsevier, Amsterdam, 1982. 228p.

LIMA, J.S.S.; OLIVEIRA, R.B. & QUARTEZANI, W.Z. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de pimenta-do-reino. Engenharia Agrícola, 15:290-298, 2007.

MOLIN, J. P. & RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. Engenharia Agrícola, 31:90-101, 2011.

OLEA, R.A. A six-step practical approach to semivariogram modeling. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 20:307-318, 2006.

OLIVEIRA, I.A.; CAMPOS, M.C.C SOARES, M.D.R.; AQUINO, R.E.; JÚNIOR, J.M & NASCIMENTO, E.P Variabilidade espacial de atributos físicos em um cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 37:1103-1112, 2013.

PREVEDELLO, C. L. Novo método para estimativa da umidade do solo na condição de capacidade de campo. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 4:23-28, 1999.

PIRES, L.F.; ROSA, J.A.; TIMM, L.C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. Acta Scientiarum Agronomy, 33:161-170, 2011.

RIBEIRO JÚNIOR, P.P. & DIGGLE, P.P. GeoR: A package for geostatistical analysis. R-News, 1:15-18, 2001.

SANA, R.S.; IBANOR ANGHINONI, I.; BRANDÃO, Z.N. & HOLZSCHUH, M.J. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo e seus efeitos na produtividade do algodoeiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 18:994-1002, 2014.

SEIDEL, E.J. & OLIVEIRA, M.S. novo índice geoestatístico para a mensuração da dependência espacial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38:699-705, 2014.

SIMÕES, W.L.; SILVA, E.L.; LIMA, D.M. & OLIVEIRA, M.S. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30:1061-1068, 2006.

SIQUEIRA, G.M.; VIEIRA, S.R. & DECHEN, S.C.F. Variabilidade espacial da densidade e da porosidade de um latossolo vermelho eutroférico sobsemeadura direta por vinte anos. *Campinas*, 68:751-759, 2009.

SOUZA, Z.M.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, G. L. CAMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P. & PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em selvíria (Ms). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25:699-707, 2001.

GEE, G. & OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H. & TOPP, C., ed. *Methods of soil analysis: Physical methods*. 2. ed. Madison, Soil Science Society of America, 2002. p. 225-289.

GIRARDELLO, V.C.; AMADO, T.J.C.; NICOLOSO, R.S.; HORBE, T.A.N.; FERREIRA, A.O.; TABALDI, F.M. & LANZANOVA, M.E. Alterações nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob plantio direto induzida por diferentes tipos de escarificadores e o rendimento da soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:2115-2126, 2011.

GREGO, C. R. & VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29:169-177, 2005.

KAMIMURA, K.M.; SANTOS, G.R.; OLIVEIRA, M.S.; JUNIOR, M.S.D. & GUIMARÃES, P.T.G. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-amarelo, sob lavoura cafeeira. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37:877-888, 2013.

KITAMURA, A.E.; CARVALHO, M.P. & LIMA, C.G.R. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31:361-369, 2007.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, 44:892-898, 1980.

CAPÍTULO 3. SIMULAÇÃO DAS FUNÇÕES HIDRÁULICAS DO SOLO POR MEIO DE MODELOS DE PEDOTRANSFERÊNCIA – *Splintex* e *Rosetta*

RESUMO

O conhecimento da curva de retenção de água no solo (CRA) é essencial para compreender e modelar os processos hidráulicos do solo. No entanto, a determinação das propriedades hidráulicas do solo são consideradas caras e de difícil obtenção, principalmente em grande escala de monitoramento. Uma alternativa que vem ganhando espaço na sua obtenção em solo de clima tropical são as Funções de Pedotransferência (FPT's), que consistem em equações com embasamento estatístico, empíricas ou fisicamente fundamentadas, usadas para estimar características edáficas de difícil determinação a partir de outras mais facilmente obtidas. Tendo vista tais dificuldades, avaliou-se neste trabalho o desempenho do programa de FPT *Splintex* na determinação dos parâmetros da equação de van Genuchten, para solo com características arenosa e argilosa; e, também, o desempenho do programa de *Splintex* em comparação com FPT *Rosetta* na obtenção das propriedades e funções hidráulicas do solo. No desenvolvimento das simulações, foram utilizadas bases de dados compostas por 103 pontos amostrais, de regiões distintas do Brasil. Cada ponto amostral foi composto por informações de textura do solo (areia, silte e argila), densidade do solo e das partículas, umidade volumétrica na saturação e informações do conteúdo relativo de água nas respectivas tensões. O desempenho das FPT's como estimador na umidade do solo foi avaliado por meio de análises de regressão linear, utilizando a correlação de Pearson. Para verificar a exatidão dos modelos, aplicou-se o *mean absolute error* (MAE) e *root mean square error* (RMSE). Em relação ao desempenho do *Splintex* em comparação ao *Rosetta*, o mesmo mostrou-se um modelo eficiente com menores erros sistemáticos, apresentado RMSE médio de $0,0298 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e correlação de 0,98 para solo arenoso, e RMSE médio de $0,0440 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e correlação de 0,92 para o solo argiloso, em comparação aos dados observados. O desempenho do FPT-*Splintex* na simulação dos parâmetros da equação de van Genuchten e outras funções hidráulicas do solo mostrou-se preciso e exato, sendo uma alternativa hábil e econômica.

Palavras-chave: Otimização da água, parâmetros hidráulicos do solo, curva de retenção da água no solo.

CHAPTER 3. SIMULATION OF SOIL HYDRAULIC FUNCTIONS THROUGH MODELS PEDOTRANSFER - *Splintex* e *Rosetta*

ABSTRACT

The knowledge of the soil water retention curve (SWRC) is essential to understand and to model the hydraulic soil processes. However, the determinations of the soil hydraulic properties are considered expensive and hard to obtain, especially in large-scale monitoring. One alternative that has recently been used in its quantification for tropical climate soils are the Pedotransfer functions (PTF's), that consist in equations with statistical, empirical or physically basis, used to estimate soil characteristics of difficult determination from other more easily obtained. Having seen these difficulties, we evaluated, in this study, the performance of PTF *Splintex* program in determining the van Genuchten equation parameters for sandy and loamy soils; and also the performance of *Splintex* program compared to PTF *Rosetta* in obtaining the soil properties and hydraulic functions. For development of simulations, were used databases composed of 103 sampling points in different regions of Brazil. Each sample point consisted of soil texture information (sand, silt and clay), soil bulk density and soil particle density, volumetric moisture at saturation or information relative to water content in the respective tension. The performance of PTF's estimator, as the soil moisture, was evaluated by linear regression analysis using the Pearson's correlation. To check the models accuracy, it was applied the mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE). Regarding the performance of the *Splintex* compared to *Rosetta*, it was proved to be an efficient model with fewer systematic errors, presented mean RMSE of $0.0298 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ and correlation of 0.98 % for sandy soil, and mean RMSE of $0.0440 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ and 0.92 % correlation for clay soil compared to observed data. The performance of the *Splintex* in the simulation of the van Genuchten equation parameters and other hydraulic functions of soil proved to be precise and accurate, resulting in a feasible alternative.

Key-Words: Optimization of water, soil hydraulic parameters, soil water retention curve.

3.3. INTRODUÇÃO

O entendimento da dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera é importante para o completo conhecimento dos processos de disponibilidade de água para as culturas, infiltração, drenagem, stress hídrico, evapotranspiração e o movimento de solutos e calor no solo.

O uso de modelos físicos para compreender a dinâmica da água no solo tem aumentado significativamente ao longo da última década. No entanto, a disponibilidade de dados de entrada para aplicação desses modelos é uma das dificuldades enfrentadas, pois a determinação direta das funções hidráulicas do solo, dentre elas a condutividade e a curva de retenção (CRA), depende de laboratório com equipamentos adequados e calibrados para suas quantificações.

A maior limitação descrita por Medrado & Lima (2014) ao desenvolvimento de modelos na estimativa das propriedades hidráulicas do solo é a inexistência de banco de dados com informações de características físico hidráulicas dos solos de diversas regiões. Assim, compreender a relação entre o conteúdo relativo de água no solo e sua tensão se torna o ponto de partida para quantificar os processos hidráulicos do solo. No entanto, a determinação direta da CRA é trabalhosa, demorada e onerosa, principalmente em grande escala de monitoramento, necessitando de padrões a ser considerados em suas quantificações.

Uma alternativa na determinação da CRA são as Funções de Pedotransferência (FPT's), que são definidas como funções físicas utilizadas para quantificação da água no solo, valendo-se de correlações de atributos do solo medidos rotineiramente com maior facilidade e menor custo, para obtenção de funções edáficas de difícil determinação. O termo FPT foi introduzido por Bouma (1989) com o objetivo de padronizar outros termos utilizados com a mesma finalidade (McBratney et al. 2002). Considerando-se a estreita relação entre essas variáveis, diversos pesquisadores como Schaap et al. (2001), Tomasella et al. (2008) e Haghverdi et al. (2014) elaboraram ou utilizaram FPT's para estimar principalmente a CRA, valendo-se de modelos de regressão que correlacionavam atributos físicos e químicos do solo, principalmente, textura, densidade e matéria orgânica.

No Brasil, a geração de FPT's vem aumentando, desde as desenvolvidas em base pontual, como a FPT desenvolvida por Tomasella & Hodnett (1998) para solos da região amazônica. No mesmo seguimento, Oliveira et al. (2002) estimaram a umidade nas tensões de 330 e 15000 hPa e a água disponível entre essas tensões a partir de dados granulométricos e

de densidade para solos do estado de Pernambuco. Um estudo mais amplo de FPT's em base pontual e paramétrica para estimativa da retenção de água a partir de amostras de vários estados brasileiros foi realizada por Tomasella et al. (2000) e Tomasella et al. (2003).

Diferentes abordagens têm sido utilizadas para o desenvolvimento de FPT's, a exemplo daquelas descritas por Fidalski & Tormena (2007) e Silva et al. (2008), que desenvolveram FPT's para estimar a CRA e curva de resistência do solo à penetração (CRP) com ampla variação textural. Reichert et al. (2009) e Michelon et al. (2010) tiveram por objetivo desenvolver FPT's para solos do Rio Grande do Sul. Barros et al. (2013) desenvolveram FPT paramétrica utilizando amostras de diferentes solos no nordeste do Brasil.

Medrado & Lima (2014) acrescentam que as FPT's desenvolvidas especialmente para a previsão da CRA para solos tropicais são muito escassas e as já existentes precisam ser melhoradas. No entanto, as FPT's para solos brasileiros foram geradas utilizando base de dados composta predominantemente de amostras de solo das regiões Sudeste e Norte, em contraste com outras regiões do Brasil.

Weynants et al. (2009) afirmaram que a maioria das FPT's disponíveis na literatura são muito limitadas, não incorporando informações sobre a estrutura do solo, que influenciam o comportamento hidráulico do solo. Ademais, os autores criticam a sua utilização generalizada em diversas regiões geográficas, diferentes daquelas para as quais foram desenvolvidas, apresentando aspectos distintos de geologia, hidrogeologia, clima e uso dos solos.

Teve-se por objetivo no presente trabalho avaliar o desempenho do programa de *Splintex* na determinação dos parâmetros da equação de van Genuchten, para solo com características arenosa e argilosa; e, também, o desempenho do programa de *Splintex* em comparação com *Rosetta* na obtenção das propriedades e funções hidráulicas do solo.

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Núcleo de Atividades de Engenharia de Biosistemas (NAEB), no Departamento de Solos e Engenharia Agrícola (DSEA), pertencentes ao Setor de Ciências Agrárias (SCA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba-PR.

3.4.1. CARACTERIZAÇÃO DE ÁREA E DOS SOLOS

Conforme triângulo textural da Sociedade Brasileira de Ciências do Solo (SBCS) os

solos utilizados no estudo foram classificados, como arenoso e argiloso. Nota-se que textura das amostras utilizadas varia nas classes de Areia-Franca e Franco-Arenosa e Argilosa e Muito-Argilosa (Figura 1). Para o solo com classificação arenosa foram obtidos 60 conjuntos de dados a partir do trabalho de Brito et al. (2011), que foi conduzido uma área localizada na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ-USP), no município de Piracicaba, São Paulo, Brasil.

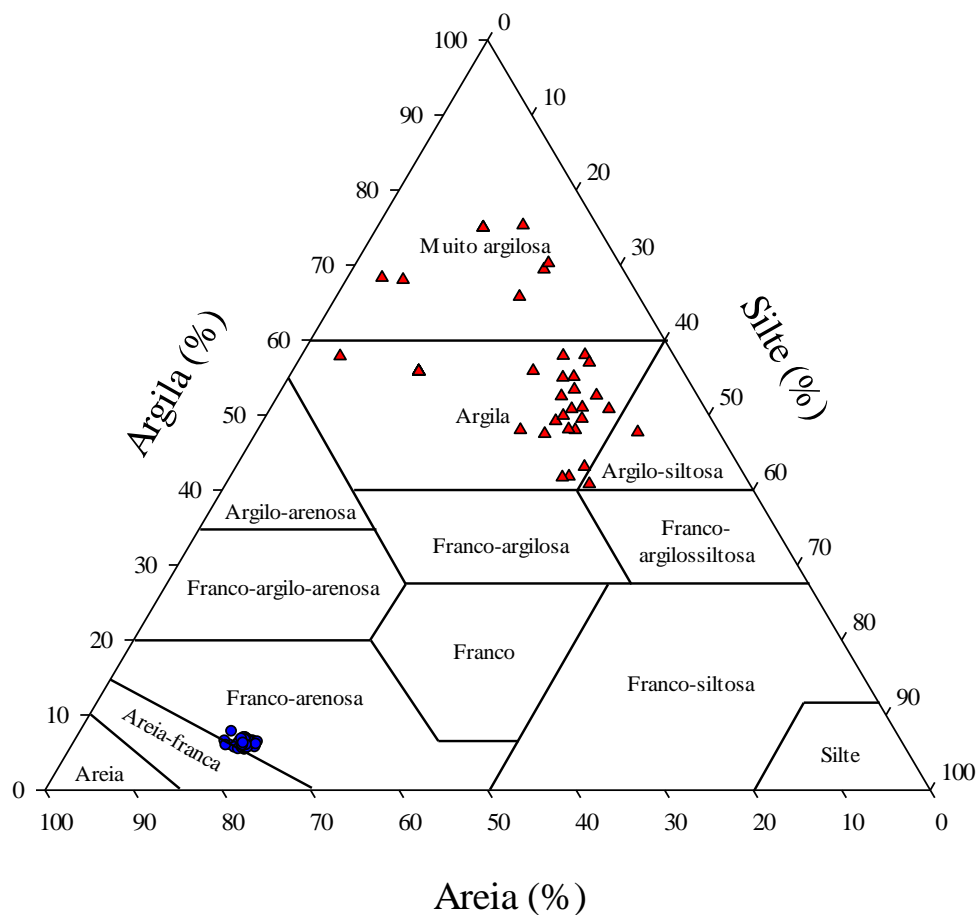


Figura 1. Classificação textural para os 60 pontos amostrais para o solo arenoso (círculos) e 43 pontos amostrais para o solo argiloso (triângulos).

Para o solo argiloso foi realizado uma busca bibliográfica em trabalhos científicos, (Tabela 1), resultando-se em 43 conjuntos de dados de solos de regiões distintas do Brasil.

Tabela 1. Origem dos dados observados que compuseram a base para elaboração da CRA para o solo argiloso.

Fonte	Nº de pontos amostrais	Classificação do solo	Região
Aguiar (2008)	3	Latossolo vermelho-amarelo	Choró – CE
Barcelos (1996)	3	Latossolo vermelho-escuro	Coxilha – RS
Gimenes (2012)	4	Latossolo vermelho-distrófico típico	Piracicaba – SP
Lucas (2010)	3	Latossolo vermelho distroférico	Cascavel – PR
Nunes (2006)	3	Latossolo vermelho distroférico	Porto Alegre – RS
Oliveira (2014)	1	Argissolo Amarelo distrófico saprolítico	Ipixuna – PA
Silva et al. (2006)	2	Latossolo vermelho-amarelo	Cerrado – DF
Souza (2012)	9	Latossolo vermelho	Pradópolis – SP
Uhde (2009)	15	Argilossolo vermelho	Santa Maria – RS

3.4.2. CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO (CRA)

As informações para obtenção das curvas de retenção de água (CRA's), observada e estimada com FPT, e os dados morfológicos dos solos arenoso e argiloso foram obtidos de duas formas: *i*) dados observados sobre a CRA, contendo pares de valores de umidade volumétrica (θ) e tensão mátrica ($|\psi_m|$) provenientes das metodologias do funil de Haines ou mesa de tensão (baixas tensões) e câmara de Richards (altas tensões); e, *ii*) dados de atributos que permitiram a utilização das FPT's *Splintex* e *Rosetta*, contendo porcentagem de areia, silte e argila, densidade do solo e das partículas, umidade volumétrica na saturação e um par de valores de (θ , $|\psi_m|$) correspondentes às tensões de 30, 60, 100 e 330 hPa.

Para ambos os solos, o ajuste da CRA dos dados observados em cada ponto amostral foi realizado nas tensões variando de 10 em 10, de 0 à 100 hPa e nas demais tensões de 300, 500, 700, 1000, 3000, 5000, 7500, 15000 hPa. O ajuste foi realizado com o modelo de van Genuchten (1980), eq.(1), valendo-se da restrição de Mualem (1976), empregando a técnica da minimização da soma dos quadrados dos desvios Santra et al., (2008), obtendo-se, assim, os parâmetros empíricos de ajuste θ_r , λ e n da eq.(1), e fixando-se θ_s ao valor correspondente à porosidade total (α).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\lambda |\psi_m|)^n\right]^{(n-1)/n}} \quad (1)$$

em que: θ : umidade volumétrica do solo, $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$; θ_s e θ_r : umidade volumétrica na saturação e residual do solo, $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$; ψ_m : potencial matricial da água no solo, hPa; $\lambda(\text{hPa}^{-1})$ e n : parâmetros de ajuste do modelo.

3.4.3. SIMULAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE VAN GENUCHTEN POR MEIO DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA

A elaboração da CRA para ambos os solos foi obtida a partir da simulação em programas computacionais nomeados *Splintex* e *Rosetta*, que geraram os parâmetros da eq.(1), resultando em FPT's paramétricas.

3.4.3.1. *Splintex*

Desenvolvido por Prevedello & Loyola (2002), o modelo de FPT foi transcrito em um algoritmo computacional nomeado *Splintex*, que utiliza atributos físicos do solo como dados de entrada (Figura 2). Têm-se como resposta (saída) os parâmetros da eq.(1), que descrevem a CRA e a condutividade hidráulica do solo saturado (K), obtidos a partir da correlação com os dados de entrada e os resultados de K do experimento de Rodas (1970). Para melhor predição dos parâmetros da eq.(1), utilizou-se um par de valores de (θ , $|\psi_m|$) conhecido experimentalmente, referente as tensões de 30, 60 e 100 hPa, a fim de se avaliar o melhor desempenho na simulação.

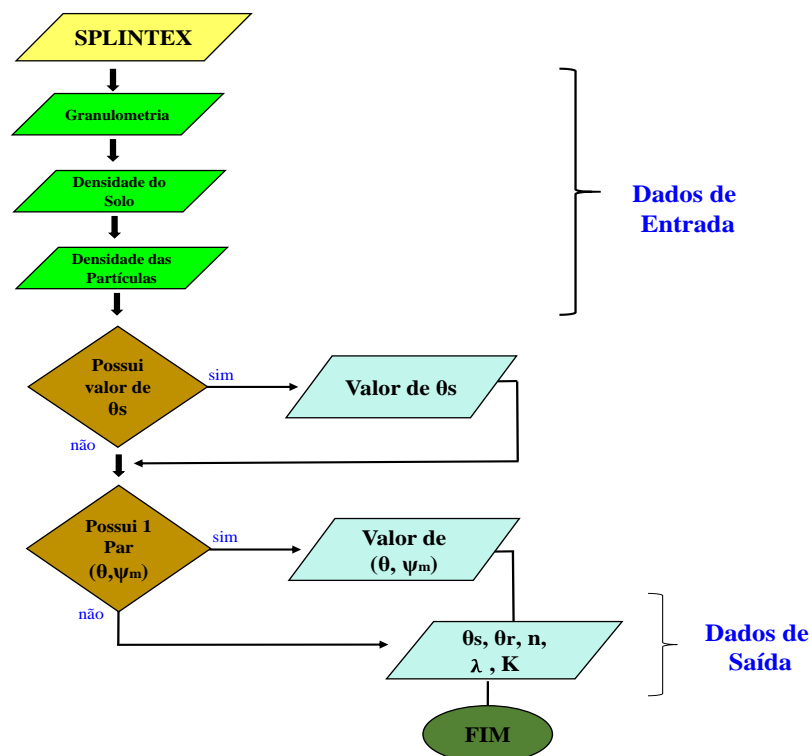


Figura 2. Fluxograma do funcionamento do *Splintex* na obtenção dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980).

O programa *Splintex* é fundamentado na proposta de Arya & Paris (1981) e na função *spline* cúbica para prever os parâmetros da equação de van Genuchten (1980), a partir de dados de granulometria, densidades do solo e das partículas, e, opcionalmente, umidade na saturação e um ponto de tensão e umidade, obtidas experimentalmente.

O algoritmo de Arya & Paris (1981) utiliza a similaridade entre as funções que descrevem a distribuição de tamanho das partículas e a CRA. O algoritmo é baseado em dois conceitos: primeiro o cálculo da umidade volumétrica a partir da distribuição do tamanho das partículas, como uma contribuição de cada fração para o molhamento do solo e por segundo da equação da capilaridade, eq.(2), que relaciona o $|\psi_m|$ com o raio do poro:

$$|\psi_m| = \frac{2 \sigma \cos(\varphi)}{\rho g r_i} \quad (2)$$

em que: ψ_m : potencial mátrico da água no solo, hPa; σ : tensão superficial na interface ar-água, N m⁻¹; φ : ângulo de contato entre água e a superfície da parede do poro (assumindo-se $\varphi = 0$); ρ_a : massa específica da água, kg m⁻³; g: aceleração da gravidade, m s⁻².

$$\theta_i = \alpha \sum_{i=0}^{i=i} w_i \quad (3)$$

em que: θ_i : i-ésima umidade volumétrica do solo, m³ m⁻³; α : porosidade do solo, m³ m⁻³; W_i : i-ésima fração gravimétrica calculada por meio da distribuição do tamanho das partículas do solo, kg kg⁻¹.

O raio dos poros é determinado a partir do raio das partículas, considerando-se o empacotamento das partículas esféricas e um fator de escalonamento, que corrige a estimativa para solos estruturados. Conhecendo-se o fator de escalonamento, pode-se estimar a CRA calculando-se a umidade pela eq.(3) e o $|\psi_m|$ pela eq.(4), para as classes de diâmetros das partículas (Vaz et al., 2005).

$$|\psi_m| = \frac{2\sigma}{\rho g R_i \left\{ \left[\frac{3w_i}{4 \pi_i R_i^3 \rho_p} \right]^{(1-\beta)} \left[\frac{2(\rho_p - \rho_s)}{3\rho_s} \right] \right\}^{1/2}} \quad (4)$$

em que: ψ_m : potencial mátrico da água no solo, hPa; σ : tensão superficial na interface ar-água, N m⁻¹; ρ : massa específica da água, ρ_s : densidade do solo, kg m⁻³; ρ_p : densidade das partículas,

kg m^{-3} ; g : aceleração da gravidade, m s^{-2} ; W_i : fração gravimétrica das partículas, kg kg^{-1} ; R_i : raio das partículas, m ; β : fator de escalonamento, adimensional.

3.4.3.2. *Rosetta*

O programa computacional *Rosetta* foi desenvolvido por Schaap et al. (2001), utilizando registros de bancos de dados hidráulicos do solo e suas respectivas propriedades físicas preditivas, que foram obtidos a partir de três bases de dados Schaap & Leij, (1998) e Schaap et al. (2001). A maioria das amostras foi obtida de solos com clima temperado a climas subtropicais da América do Norte e Europa.

Composto por cinco FPT's hierárquicas, o *Rosetta* é capaz de estimar as funções CRA e condutividade hidráulica do solo saturado não saturado $K(\theta)$, por meio dos parâmetros da eq.(1). Assim como realizado no *Splintex*, as funções foram simuladas para os mesmos 60 pontos amostrais do solo arenoso e 43 do argiloso, valendo-se dos seguintes dados de entrada: porcentagem de areia, silte e argila, densidade do solo e um par de $(\theta, |\psi_m|)$. Sabendo-se que o *Rosetta* permite a inserção, por parte do usuário, do par $(\theta_{330}, 330)$ ou pares $(\theta_{330}, 330)$ e $(\theta_{15000}, 15000)$ de pontos, optou-se pela tensão de 330 hPa, que é mais facilmente obtida experimentalmente em laboratório. Entende-se que não se justifica estimar a CRA a partir da determinação de θ na tensão de 15000 hPa, que representa o ponto ensaiado mais demorado da CRA, contrariando a finalidade da estimativa das funções hidráulicas do solo por meio de FPT's.

3.4.4. PROPRIEDADES E FUNÇÕES HIDRÁULICAS DO SOLO OBSERVADAS E SIMULADAS POR FPT's

Com os parâmetros θ_r , λ e n , da eq.(1) de ambos os solos, obtidos no ajuste dos dados observados e nas simulações realizadas no *Splintex* e *Rosetta* realizou-se o equacionamento de outras funções hidráulicas do solo como a condutividade hidráulica, capacidade específica da água e difusividade hidráulica do solo. Assim, avaliou-se o desempenho da simulação na composição dessas funções estabelecidas com os dados observados e simulados pelas FPT's. Além das funções hidráulicas, analisaram-se também alguns atributos hidráulicos como a condutividade hidráulica do solo saturado, umidades volumétrica na capacidade de campo e no ponto de murchamento permanente, capacidade de água disponível, porosidade de aeração, entre outros, que são descritos a seguir:

3.4.4.1. Porosidade total

Os valores de porosidade total (α) foram obtidos nos 60 pontos amostrais do solo arenoso a partir do experimento de Brito (2010) e nos 43 pontos amostrais do solo argiloso a partir dos trabalhos citados na (Tabela 1). Com os valores, estabeleceu-se a umidade volumétrica na saturação (θ_s), parâmetro da eq.(1), uma vez que na saturação, $\alpha = \theta_s$. Assim, no ajuste da CRA observada e simulada pelas FPT's *Splintex* e *Rosetta*, determinaram-se apenas os parâmetros θ_r , λ e n .

3.4.4.2. Condutividade hidráulica do solo saturado

Os valores observados da condutividade hidráulica do solo saturado (K) foram obtidos por Brito (2010) em campo valendo-se do método do perfil instantâneo, na camada de profundidade de 0,75 a 0,85 m, seguindo a proposta por Hillel et al. (1972) e determinando os valores de K pelo método de Libardi et al. (1980). Detalhes do experimento podem ser obtidos em (Brito 2010).

3.4.4.3. Capacidade de água disponível

Os valores de capacidade de água disponível (CAD) foram determinados, para os solos arenoso e argiloso, tomando-se a diferença entre umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) e a umidade volumétrica no ponto de murchamento permanente (θ_{pmp}) para dada camada de solo (z), $CAD = [\theta_{cc} - \theta_{pmp}] \cdot z$, segundo van Lier (2010). O valor de z foi estabelecido em 100 mm, já que a camada de solo varia de 0,75 a 0,80 m para o solo arenoso e 0,20 a 0,30 m para solo argiloso. O valor de θ_{pmp} foi obtido a partir da eq.(1) na tensão de 15000 hPa e o de θ_{cc} conforme eq. (5), (Prevedello, 1999).

3.4.4.4. Umidade volumétrica na capacidade de campo

A umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) é atingida quando a taxa de drenagem do solo atingir um valor desprezível. Esse valor é atingido quando a variação da umidade em relação ao tempo tender a zero ($d\theta/dt \rightarrow 0$), ou seja, quando a razão entre condutividade hidráulica do solo insaturado e saturação [$K(\theta)/K$] for negligenciável, eq.(5), (Prevedello, 1999; Andrade & Stone, 2011; Armindo, 2013).

$$\theta_{cc} = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\left(\frac{K(\theta)}{K} \right)^{\left(\frac{1,5n+0,5}{0,5-2,5n} \right)} \right]^{\left(\frac{1-n}{1,5n+0,5} \right)} \quad (5)$$

em que: θ_{cc} : umidade volumétrica na capacidade de campo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; θ_s e θ_r : umidade volumétrica na saturação e residual do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; $[K(\theta)/K]$: taxa de drenagem quando atingir 1% da condutividade hidráulica na saturação; e n : parâmetro de ajuste da eq.(1), adimensional.

3.4.4.5. Potencial mátrico referente a capacidade de campo

Para cada ponto amostral foi quantificado o $|\psi_m|$ referente à θ_{cc} , valendo-se da eq.(1), que foi expressa na forma da tensão como variável dependente, eq.(6).

$$|\psi_m(\theta_{cc})| = \frac{1}{\lambda} \left[\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_{cc} - \theta_r} \right)^{n/(n-1)} - 1 \right]^{1/n} \quad (6)$$

em que: $[\psi_m(\theta_{cc})]$: potencial mátrico na capacidade de campo, hPa; θ_s e θ_r : umidade volumétrica na saturação e residual do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; θ_{cc} : umidade volumétrica na capacidade de campo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; λ (hPa^{-1}) e n : parâmetros de ajuste.

3.4.4.6. Porosidade de aeração

A porosidade de aeração (α_{ar}) foi fixada e quantificada considerando-se a expressão ($\alpha_{ar} = \theta_s - \theta_{cc}$). Esse conceito estabelece a capacidade mínima do solo em disponibilizar ar, quando esse estiver livre de água depois de uma chuva de longa duração e baixa intensidade de precipitação.

3.4.4.7. Função condutividade hidráulica do solo não saturado

Para o cálculo da condutividade hidráulica do solo não saturado $[K(\theta)]$ em cada ponto amostral foi utilizada a eq.(7), proposta por van Genuchten (1980). As umidades volumétricas foram consideradas entre o maior valor de θ_s e o menor valor de θ_r , dispostos no banco de dados, sendo subdivididas em 0,12; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35 e 0,40 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

Os valores da K para o solo arenoso foram determinados por Brito (2010) descritos no item 3.4.4.2. Considerou-se também a função $K(\theta)$ quando a umidade volumétrica atingir a

capacidade de campo ($\theta = \theta_{cc}$), conforme eq.(5). Assim, objetivou-se avaliar especificamente a $K(\theta_{cc})$ nesse ponto por ser um valor frequente na literatura.

$$K(\theta) = K \left\{ \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{0.5} \left[1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{n/(n-1)} \right]^{(n-1)/n} \right]^2 \right\} \quad (7)$$

em que: $K(\theta)$: condutividade hidráulica do solo não saturado, $m\ s^{-1}$; K : condutividade hidráulica do solo saturado, $m\ s^{-1}$; θ_s e θ_r : umidade volumétrica na saturação e residual do solo, $m^3\ m^{-3}$; n : parâmetro de ajuste da eq.(1).

3.4.4.8. Potencial mátrico no ponto de inflexão da CRA

Com as curvas de retenção dos solos arenoso e argiloso determinou-se o potencial mátrico referente ao ponto de inflexão (ψ_{mi}), eq.(8), (Prevedello & Armindo, 2015).

$$|\psi_{mi}| = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{n-1}{n} \right)^{1/n} \quad (8)$$

em que: ψ_{mi} : potencial mátrico no ponto de inflexão da CRA, hPa; n e λ (hPa^{-1}): parâmetros de ajuste da eq.(1).

Com isso, pôde-se analisar o desempenho das FPT's *Splintex* e *Rosetta* a esquerda do ponto de inflexão (parte úmida ou em baixas tensões) e a direita desse ponto (parte seca ou em altas tensões) das 103 CRA's geradas (Figura 3).

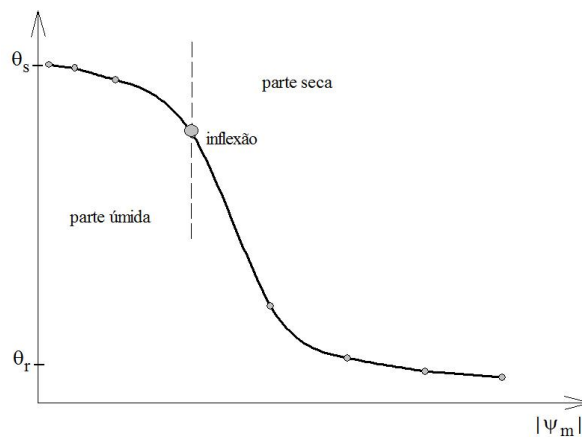


Figura 3. Curva de retenção de água no solo apresentando o ponto de inflexão, parte seca e parte úmida.

3.4.4.9. Função capacidade específica da água no solo

A capacidade específica da água no solo $[C(\theta)]$ é obtida realizando-se a derivada da eq.(1) (Prevedello & Armindo, 2015). A função é representada pela eq.(9) e possui diversas aplicações na Física do Solo, dentre elas a associação com a distribuição de frequência dos poros. Aplicando-se na eq.(9) as tensões referentes aos valores de umidade aplicados na eq.(7) resulta-se na função $C(\theta)$ para cada ponto amostral em ambos os solos.

Determinou-se também $C(\theta)$ referente a θ_{cc} , para ambos os solos analisados, devido a frequência da θ_{cc} na literatura.

$$C(\theta) = \frac{-(n-1)\lambda^n (\theta_s - \theta_r) |\psi_m|^{n-1}}{\left[1 + (\lambda |\psi_m|)^n\right]^{(2n-1)/n}} \quad (9)$$

em que: $C(\theta)$: capacidade específica da água no solo, hPa^{-1} ; θ_s e θ_r : umidade volumétrica na saturação e residual do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; ψ_m : potencial matricial, hPa ; n e λ (hPa^{-1}): parâmetros de ajuste da eq.(1).

3.4.4.10. Função difusividade hidráulica no solo

A difusividade hidráulica no solo $[D(\theta)]$ foi obtida pela razão entre a eq.(7) e a eq.(9) (Prevedello & Armindo, 2015). Assim, a $D(\theta)$ foi resultada nas respectivas umidades volumétricas introduzidas nas funções $K(\theta)$ e $C(\theta)$, eq.(15).

Assim como realizado nas funções $K(\theta)$ e $C(\theta)$, também foi determinada a $D(\theta)$ referente a θ_{cc} , ou seja, da $D(\theta_{cc})$.

$$D(\theta) = \frac{K(\theta)}{C(\theta)} \quad (10)$$

em que: $D(\theta)$: difusividade hidráulica do solo, $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$; $K(\theta)$: condutividade hidráulica do solo não saturado, cm s^{-1} ; $C(\theta)$: capacidade específica do solo, hPa^{-1} .

3.4.5. ÍNDICES ESTATÍSTICOS PARA AVALIAÇÃO DA PRECISÃO E EXATIDÃO DOS MODELOS *Splintex* e *Rosetta*

O desempenho das FPT's como estimadoras das funções e parâmetros hidráulicos do solo foi avaliado por meio de análises de regressão linear entre os dados observados e

estimados. A associação linear existente entre as variáveis observadas e estimadas, no *Splintex* ou *Rosetta*, foi realizada com o coeficiente de correlação “r” de Pearson, eq.(11), que indica a precisão, ou o grau de repetibilidade, entre duas variáveis (X, Y) quaisquer.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{\text{est}_i} - \bar{Y}_{\text{est}_i})(X_{\text{obs}_i} - \bar{X}_{\text{obs}_i})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (Y_{\text{est}_i} - \bar{Y}_{\text{est}_i})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N (X_{\text{obs}_i} - \bar{X}_{\text{obs}_i})^2 \right]}} \quad (11)$$

em que: r: coeficiente de correlação de Pearson; Y_{est_i} : i-ésima variável estimada; X_{obs_i} : i-ésima variável observada; \bar{Y}_{est_i} : média da i-ésima variável estimada; \bar{X}_{obs_i} : média da i-ésima variável observada, N: número de amostras analisadas.

Para a quantificação dos erros sistemáticos, ou da exatidão, nas simulações realizadas no *Splintex* e *Rosetta*, aplicou-se o *mean absolute error* (MAE) conforme eq.(12), que mede a tendência do modelo superestimar ou subestimar os resultados em relação ao observado. Hallak & Filho (2011) descrevem que o MAE é considerado um índice robusto como medida da habilidade de modelos numéricos em reproduzir a realidade. Outra medida utilizada para verificar a exatidão dos modelos foi a *root mean square error* (RMSE), conforme (eq.13). O RMSE é comumente usado para expressar a exatidão dos resultados numéricos, apresentando valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada. Santra & Das (2008) e Yi et al. (2013) adotaram essa metodologia de análise em suas pesquisas, para avaliar o quanto os dados estimados se aproximaram dos dados observados.

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_{\text{est}_i} - X_{\text{obs}_i}| \quad (12)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{\text{est}_i} - X_{\text{obs}_i})^2} \quad (13)$$

em que: MAE: *mean absolute error*; RMSE: *root mean square error*; N: número de amostras da população. Y_{est_i} : i-ésima variável estimada; X_{obs_i} : i-ésima variável observada.

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1. DESCRIÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

A amplitude de variação entre as diferentes propriedades e características utilizadas para o solo arenoso e argiloso é apresentada por meio da estatística descritiva (Tabela 2).

Tabela 2. Estatística descritiva das frações granulométricas (areia, silte e argila), densidade do solo e das partículas e porosidade total, nos 60 pontos amostrais do solo arenoso e 43 pontos amostrais do solo argiloso.

Estatística Descritiva	Frações (%)			ρ_p	ρ_s	α
	Areia	Silte	Argila	----- (kg m ⁻³)	-----	(%)
Solo Arenoso						
Maior	76,55	7,78	20,90	2693	1592	47,80
Menor	72,78	5,38	17,09	2693	1452	39,70
Média	74,40	6,01	19,52	-	1509	43,80
DP	0,7367	0,4607	0,7807	-	30,63	1,49
CV %	0,9902	7,67	4,00	-	2,03	3,40
Solo Argiloso						
Maior	43,10	37,73	75,29	2950	1500	64,00
Menor	3,930	8,000	40,80	2500	960	38,00
Média	29,70	16,50	55,67	2610	1350	50,00
DP	11,31	7,930	9,270	108,72	141,65	0,08
CV %	38,10	48,05	16,66	4,17	10,49	15,10

DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação; ρ_p : densidade das partículas; ρ_s : densidade do solo; α : porosidade total.

Os teores granulométricos, porosidade total (α), as densidades das partículas (ρ_p) e do solo (ρ_s) apresentaram coeficiente de variação (CV) baixa, para o solo arenoso com média de 74,40% de areia e 1509 kg m⁻³ para a ρ_s . Esses valores foram semelhantes aos encontrados por Oliveira et al. (2002) e Barros et al. (2013), que desenvolveram FPT's com base pontual e paramétrica na região do Nordeste do Brasil.

Solos de textura mais grossa geralmente têm menor capacidade de armazenamento de água no solo. Nesse sentido, verifica-se que o teor de areia médio (74,40%) das amostras arenosas utilizadas para a simulação no *Splintex* e *Rosetta*, indicando, em geral, baixa capacidade de armazenamento de água.

Já para solo argiloso, o teor médio de argila foi de 55,67%, com CV relativamente maior em comparação aos dados obtidos no solo arenoso. Isso está relacionado com a obtenção dos dados para solo argiloso, na literatura, de áreas distintas.

Valores semelhantes foram observados para a granulometria e ρ_s nos estudos de Silva et al. (2008) em solo argiloso na região de Lençóis Paulista – SP. Esses autores

desenvolveram FPT's pontual, correlacionado os resultados com a curva de resistência a penetração (CRP) verificando maior influência dos teores de argila na CRP, do que na estimativa dos parâmetros da CRA.

Tomasella et al. (2000) desenvolveram FPT's paramétricas, em solos de diversas regiões do Brasil, as quais são referência para solos de regiões tropicais. Esses autores verificaram na maioria dos pontos amostrais teores de silte raramente excedendo 50%. Barros et al. (2013) acrescentam que as razões para baixa exatidão nas FPT's desenvolvidas em solos de regiões temperadas, quando aplicada em outras condições, podem estar atrelada aos baixos teores de silte em solos tropicais, ao contrário dos solos de regiões temperadas, que apresentam teores mais elevados.

3.5.2. COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS DE AJUSTE DO MODELO DE VAN GENUCHTEN OBSERVADOS E SIMULADOS PELO *Splintex* e *Rosetta*

Os parâmetros da eq.(1) obtidos no ajuste dos dados observados e simulados no *Splintex* e *Rosetta* podem ser verificados na (Tabela 3). Nota-se que a variabilidade dos parâmetros estimados é menor que nos dados observados, verificado pelo baixo CV. Isso pode estar atrelado, devido às simulações constituírem de modelos que estimam valores mais em torno da média, ou seja, com menor variação.

Verificou-se menor variação entre os parâmetros da eq.(1), simulados com *Rosetta*, em comparação com a simulação do *Splintex*, exceto para o parâmetro n do solo arenoso. Já a simulação realizada com o *Splintex*, em relação à média, subestimou os valores na maioria dos parâmetros. Os parâmetros λ e n , que determinam a forma da CRA, apresentaram variabilidade acentuada, com maior evidência no solo argiloso. Os resultados corroboram com os obtidos por Barros et al. (2013), para solo arenoso, que apresentaram desvio padrão (DP) similar entre os parâmetros da eq.(1).

Os parâmetros θ_s e θ_r apresentaram valores médios de 0,4382 e 0,0872 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para solo arenoso e 0,50 e 0,2283 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para solo argiloso, respectivamente. Nota-se que os valores de θ_r para solo argiloso foram maiores em relação ao solo arenoso, por apresentar maior microporosidade, e por sua vez, caracterizam-se por se esvaziarem mais lentamente proporcionando uma condução de água pelo solo mais lenta.

Tabela 3. Estatística descritiva dos parâmetros da eq. (1), observados e simulados pelas FPT's.

Estatística Descritiva		θ_r (m ³ m ⁻³)	λ (hPa ⁻¹)	n	m
Solo Arenoso					
Observada	Máximo	0,1189	0,1830	2,0766	0,5184
	Mínimo	0,0055	0,0300	1,2305	0,1873
	Média	0,0872	0,0509	1,5976	0,3741
	DP	0,0239	0,0267	0,2026	0,0806
	CV (%)	27,411	52,547	12,680	21,552
Splintex 30 hPa	Máximo	0,0926	0,1118	1,9541	0,4883
	Mínimo	0,0746	0,0383	1,6914	0,4088
	Média	0,0852	0,0604	1,7801	0,4382
	DP	0,0036	0,0161	0,0565	0,0174
	CV (%)	4,2786	26,591	3,1751	3,9797
Splintex 60 hPa	Máximo	0,0926	0,1110	1,9472	0,4864
	Mínimo	0,0746	0,0359	1,6798	0,4047
	Média	0,0853	0,0535	1,7669	0,4359
	DP	0,0037	0,0156	0,0583	0,0183
	CV (%)	4,3522	29,229	3,3013	4,1949
Splintex 100 hPa	Máximo	0,0926	0,1128	1,9439	0,4856
	Mínimo	0,0746	0,0355	1,6787	0,4043
	Média	0,0852	0,0509	1,7659	0,4337
	DP	0,0037	0,0163	0,0589	0,0185
	CV (%)	4,3946	32,135	3,3362	4,2691
Rosetta 330 hPa	Máximo	0,0741	0,0423	2,2227	0,5501
	Mínimo	0,0634	0,0373	1,5749	0,3650
	Média	0,0690	0,0401	1,8562	0,4613
	DP	0,0021	0,0014	0,1507	0,0433
	CV (%)	3,1102	3,5542	8,1290	9,3856
Solo Argiloso					
Observada	Máximo	0,3200	0,2200	2,0491	0,5120
	Mínimo	0,1200	0,0010	1,2000	0,1667
	Média	0,2283	0,0547	1,3096	0,2364
	DP	0,0413	0,0505	0,1535	0,0694
	CV (%)	18,074	92,300	11,723	29,348
Splintex 30 hPa	Máximo	0,3923	0,2655	3,6081	0,7228
	Mínimo	0,0560	0,0217	1,1277	0,1132
	Média	0,2351	0,0276	2,6172	0,6179
	DP	0,0790	0,0516	0,7889	0,2091
	CV (%)	33,592	186,91	30,141	33,845
Splintex 60 hPa	Máximo	0,3514	0,2101	3,2810	0,6952
	Mínimo	0,0000	0,0107	1,1161	0,1040
	Média	0,2310	0,0174	2,4609	0,5936
	DP	0,0980	0,0440	0,7125	0,2001
	CV (%)	42,440	252,42	28,953	33,711
Splintex 100 hPa	Máximo	0,3395	0,3226	3,2037	0,6879
	Mínimo	0,0050	0,0052	1,1413	0,1238
	Média	0,2153	0,0130	2,3217	0,5693
	DP	0,0965	0,0703	0,7063	0,2063
	CV (%)	44,835	542,58	30,421	36,2304
Rosetta 330 hPa	Máximo	0,1447	0,0375	1,7215	0,4191
	Mínimo	0,0833	0,0076	1,1748	0,1488
	Média	0,0987	0,0267	1,2731	0,2145
	DP	0,0147	0,0046	0,1338	0,0676
	CV (%)	14,862	17,137	10,509	31,5273

DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação; θ_s e θ_r : umidade volumétrica na saturação e residual; λ e n: parâmetros de ajuste.

Encontrou-se na simulação do *Splintex* para o solo arenoso valor similar para λ , em comparação com a média do observado, já o valor médio de λ simulado com o *Rosetta* foi subestimado. Percebe-se que os valores médios de λ são maiores para o solo arenoso, estando atrelado com a entrada de ar ou pressão de borbulhamento, responsável pelo esvaziamento de água por parte dos poros em tensões relativamente pequenas. Barros et al. (2013) utilizando regressão múltipla encontraram valores médios para λ de $0,033 \text{ hPa}^{-1}$ e 1,716 para n , em solos do Nordeste do Brasil.

Um fator importante relacionado na estimativa dos parâmetros λ e n da eq.(1) por FPT's, relatado por vários autores (Wösten et al., 2001; Pachepsky & Rawls, 2004; Barros et al., 2013), deve-se ao fato de que esses parâmetros não são propriedades físicas reais do solo, e seus valores são muito sensíveis ao método e critérios de ajuste. Em todos esses trabalhos, os resultados foram semelhantes na estimativa dos parâmetros da eq.(1), principalmente para λ e n , o que reforça a dificuldade de se estabelecer a relação entre propriedades morfológicas, estrutura e retenção de água no solo.

Silva et al. (2008) para solos com característica arenosa e argilosa, do município de Lençóis Paulista- SP, realizaram a simulação dos parâmetros da eq.(1), resultando variação na ordem de 0,00006 a 0,4446 de erro padrão entre os parâmetros. Scheinost et al. (1997) também encontraram dificuldade em estimar os parâmetros λ e n da eq.(1), utilizando métodos de regressão linear múltipla. Tomasella et al. (2000) e Botula et al. (2014), em trabalhos de revisão sobre FPT, considerando vários tipos de solos e em regiões distintas, mostraram que os resultados para λ e n são imprecisos.

Embora os valores dos parâmetros apresentaram CV relativamente altos, o bom desempenho de uma FPT para estimar o conteúdo relativo de água depende da combinação de todos os parâmetros da equação de van Genuchten (Barros et al., 2013).

Com os parâmetros observados e simulados com o *Splintex* e *Rosetta* da eq.(1), obteve-se as CRA's observada e simulada. Na (Tabela 4), são apresentados a correlação e os erros sistemáticos (r , MAE e RMSE) obtidos nas simulações para a predição da umidade no solo a partir da CRA. Observou-se que os valores de umidade volumétrica, estimados com o *Splintex* e *Rosetta*, apresentaram boa correlação com os dados observados. Nas tensões 30, 60 e 100 hPa houve variabilidade na precisão e exatidão da simulação do conteúdo volumétrico de água no solo (Tabela 4).

Tabela 4. Estatística descritiva da umidade volumétrica (θ) observada e estimada com o *Splintex* e *Rosetta*.

FPT	MAE	RMSE	r
	----- $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ -----	-----	-----
Solo Arenoso			
<i>Splintex</i> 30 hPa	0,0311	0,0379	0,9759
<i>Splintex</i> 60 hPa	0,0249	0,0301	0,9833
<i>Splintex</i> 100 hPa	0,0244	0,0298	0,9824
<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,0285	0,0324	0,9884
Solo Argiloso			
<i>Splintex</i> 30 hPa	0,0462	0,0596	0,8441
<i>Splintex</i> 60 hPa	0,0360	0,0496	0,9046
<i>Splintex</i> 100 hPa	0,0328	0,0440	0,9279
<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,0407	0,0536	0,9572

RMSE: root mean square error; MAE: mean absolute error; r: coeficiente de correlação.

A utilização dos pares de valor na tensão de 100 hPa proporcionou os melhores resultados de exatidão para ambos os solos (menores valores de RMSE e MAE), que correspondem aos respectivos valores de $0,0298 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ e $0,0244 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ para solo arenoso e $0,0440 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ e $0,0328 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ para solo argiloso. A variação na precisão foi irrelevante nas tensões de 60 e 100 hPa. Embora os valores apresentaram maior correlação na simulação com o *Rosetta* em ambos os solos, indicando maior precisão, observou-se também menor grau de exatidão, evidenciando maiores erros sistemáticos na simulação dos parâmetros da eq.(1) pelo *Rosetta*.

Os erros, transformados em lâminas de água armazenadas no perfil do solo (multiplicados pela espessura da camada analisada), representam 2,98; 2,44; 4,40 e 3,28 mm, respectivamente. Em termos práticos são os valores de erros médios de subestimativa ou superestimativa do armazenamento de água, na camada de 0,75 a 0,85 m do perfil do solo, quando comparado ao armazenamento médio que seria obtido medindo-se em laboratório a CRA. Para fins de planejamento da irrigação, medição em bacias hidrográficas, entre outras aplicações, que necessitam de medições em grande escala, os erros podem ser considerados pequenos, apresentando bom desempenho na estimativa da CRA.

Os valores foram menores em comparação aos resultados obtidos por van den Berg et al. (1997), que utilizaram como preditores a granulometria e ρ_s , para Latossolos do Brasil, obtendo valor de RMSE de $0,080 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$. Tomasella et al. (2000) desenvolveram uma FPT para os parâmetros da eq.(1), e encontraram valores de RMSE da ordem de $0,032$ a $0,427 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, para solos de diversas regiões do Brasil, as quais são referência para solos tropicais. Oliveira et al. (2002) em solos do estado de Pernambuco, desenvolveram FPT pontual, a

partir de dados granulométricos e de ρ_s , apresentando valores médios de RMSE de $0,046 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e alto coeficiente de correlação (r), variando de 0,8106 a 0,926. Hodnett & Tomasella (2002) desenvolveram também uma FPT paramétrica para Latossolos, Andossolos, utilizando como preditores a granulometria e a ρ_s . Como diferencial em comparação com outras FPT's adicionaram a mineralogia de argilas, resultando em um valor médio de RMSE de $0,066 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Abordagens têm sido utilizadas para o desenvolvimento de FPT's, a exemplo as descritas por Fidalski & Tormena (2007) em solos no noroeste do Paraná, avaliaram FPT paramétrica para CRA e CRP. Os autores concluíram que as FPT's foram dependentes da ρ_s , do carbono orgânico e do manejo, apresentando coeficientes de determinação médio (R^2) de 0,94, no ajuste das CRA's.

Michelon et al. (2010) desenvolveram FPT's paramétricas para estimar a retenção de água em alguns solos do estado do Rio Grande do Sul. Os autores observaram que a melhor estimativa foi na tensão de 330 hPa, com exceção da FPT pontual obtida para estimar a tensão de 15000 hPa. As demais FPT's apresentaram erro médio (EM) negativo, indicando subestimativa da umidade do solo, variando o RMSE de $0,0165$ a $0,0310 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e o ME de $-0,0020$ a $0,0028 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Utilizando a abordagem fractal e *Rosetta*, Ghanbarian-Alavijeh et al. (2010) avaliaram a estimativa dos parâmetros da eq.(1), a partir de um conjunto de 75 pontos amostrais obtidos na literatura do banco de dados UNSODA. Os resultados apresentaram RMSE de $0,081 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para abordagem fractal e $0,136 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para *Rosetta*.

Em solos arenosos da Índia, com características similares deste estudo, Patil et al. (2012) elaboraram FPT's paramétricas utilizando a eq.(1). Os resultados médios, alcançados para predição da umidade do solo foram, respectivamente, $0,0249$ e $0,0868 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o RMSE e MAE. Para Medeiros et al. (2014) as FPT's paramétricas foram mais eficientes, comparando-as com as de ponto na estimativa da θ em potenciais específicos (100, 330, 15000 hPa). As médias de ME obtidas variaram entre $0,01$ e $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e RMSE entre $0,07$ e $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Valores de referência para erros encontrados na estimativa da umidade do solo estimada por FPT's, em diversas regiões no mundo, podem ser encontrados em Wösten et al. (2001) e Pachepsky et al. (2001), que apresentam variações de erro entre $0,02$ a $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Em vista do exposto, os resultados evidenciaram que o desempenho com o *Splintex* 100 hPa, apresentou erros menores na estimativa da umidade do solo, comparando com outras FPT's mencionadas, utilizando características similares. Os menores erros, podem estar atrelados no princípio da simulação. O *Splintex* utiliza o princípio do algoritmo de Arya & Paris (1981), e a umidade na saturação medida como parâmetro de entrada, diferindo das outras FPT's. O *Rosetta* é constituído de uma série de dados de determinadas regiões, resultando em valores médios provenientes de ajuste de regressão.

Vaz et al. (2005) avaliaram o desempenho do algoritmo Arya & Paris (1981) utilizando 104 amostras de solos representativos no Sul e Sudeste do Brasil. Os autores concluíram que as estimativas dos modelos de CRA foram satisfatórias para os solos da região, com erros variando entre 0,062 e 0,136 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na umidade volumétrica do solo.

Na (Figura 4) mostra-se graficamente em retas 1:1 a avaliação estatística das umidades volumétricas ao longo das tensões preditas utilizando-se o *Splintex* e *Rosetta*.

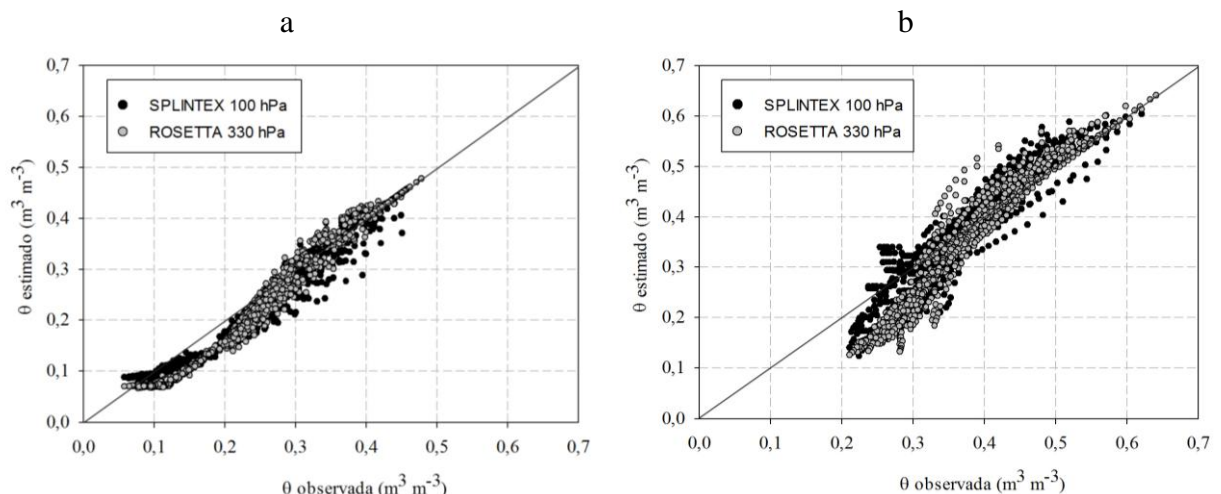


Figura 4. Umidade volumétrica do solo ao longo das tensões com os valores observados e simulados pelo *Splintex* e *Rosetta*: (a) 60 pontos amostrais para solo arenoso; (b) 43 pontos amostrais para solo argiloso.

Verificou-se que a dispersão homogênea dos pontos em relação à reta 1:1 indica que as FPT's avaliadas apresentaram boa precisão na estimativa da umidade do solo. Ao analisar as umidades observadas e estimadas para o solo arenoso, notou-se pequena subestimativa entre os valores, sendo mais realçada em maiores umidades, mostrando que a relação entre a umidade e a granulometria do solo estreita-se à medida que os $|\psi_m|$ ficam maiores. Neste caso,

a composição granulométrica é a que melhor descreve a retenção de água no solo nesses potenciais.

De acordo com Reichardt & Timm (2004) com a granulometria do solo explica-se mais de 80% da retenção da água no solo, representando um parâmetro físico importante para o comportamento geral da CRA. Contudo, sabe-se que para altas umidades volumétricas do solo, nos quais os fenômenos capilares são atuantes na determinação da tensão, a CRA depende mais do arranjo e das dimensões dos poros, ou seja, da estrutura do solo.

Notou-se para o solo argiloso a existência de pontos discrepantes que subestimaram e superestimaram, tanto para simulação com *Splintex* e *Rosetta* (Figura 4). Esses pontos correspondem aos pontos 11, 12 e 29 para simulação realizada com o *Rosetta* e ao ponto 29 para *Splintex*. Essa variação está atrelada com os parâmetros obtidos da eq.(1), referente ao ponto 29, que apresentou valor de n de 2,0491 e de λ , o menor valor, de 0,0010, diferindo dos demais.

Nas (Figuras 5 e 6) são apresentadas as CRA's com o melhor e o pior ajuste entre os 60 pontos amostrais para solo arenoso e 43 pontos amostrais para solo argiloso. Observou-se que o menor RMSE para o melhor ajuste em ambos os solos, ocorreu na simulação com *Splintex* 100 hPa, com boa representação da CRA. Os ajustes dos pontos em altas tensões de ambos os solos, mesmo no pior ajuste, foram precisos e com aceitável exatidão, subestimando um pouco os valores nessa região da CRA.

As CRA's ajustas para o solo arenoso pela eq.(1) mostram rápida diminuição da umidade com pouco aumento na sucção e, portanto, baixa capacidade de retenção água confirmando o comportamento de solos arenosos.

No melhor ajuste com o *Rosetta* (Figuras 5 e 6), verificou-se uma tendência em superestimar a umidade em baixas tensões e de subestimar em médias tensões. O baixo desempenho do *Rosetta* nessa situação pode estar interligado ao fato de os parâmetros utilizados na obtenção da FPT possuírem características de regiões temperadas, pois a fração silte é menor em regiões de clima tropicais (Hodnett et al., 2002).

As diferenças podem explicar por que há erros de predição dos solos brasileiros. Segundo Tomasella et al. (2000), os erros aumentam com o aumento do teor de silte e a aplicação da FPT disponível para solos tropicais é ineficiente, uma vez que foram desenvolvidas e testadas para os solos de clima temperado. Ademais, outros fatores

relacionados à diferença mineralógica da fração argila e propriedades distintas dos componentes da matéria orgânica em solos tropicais devem ser considerados.

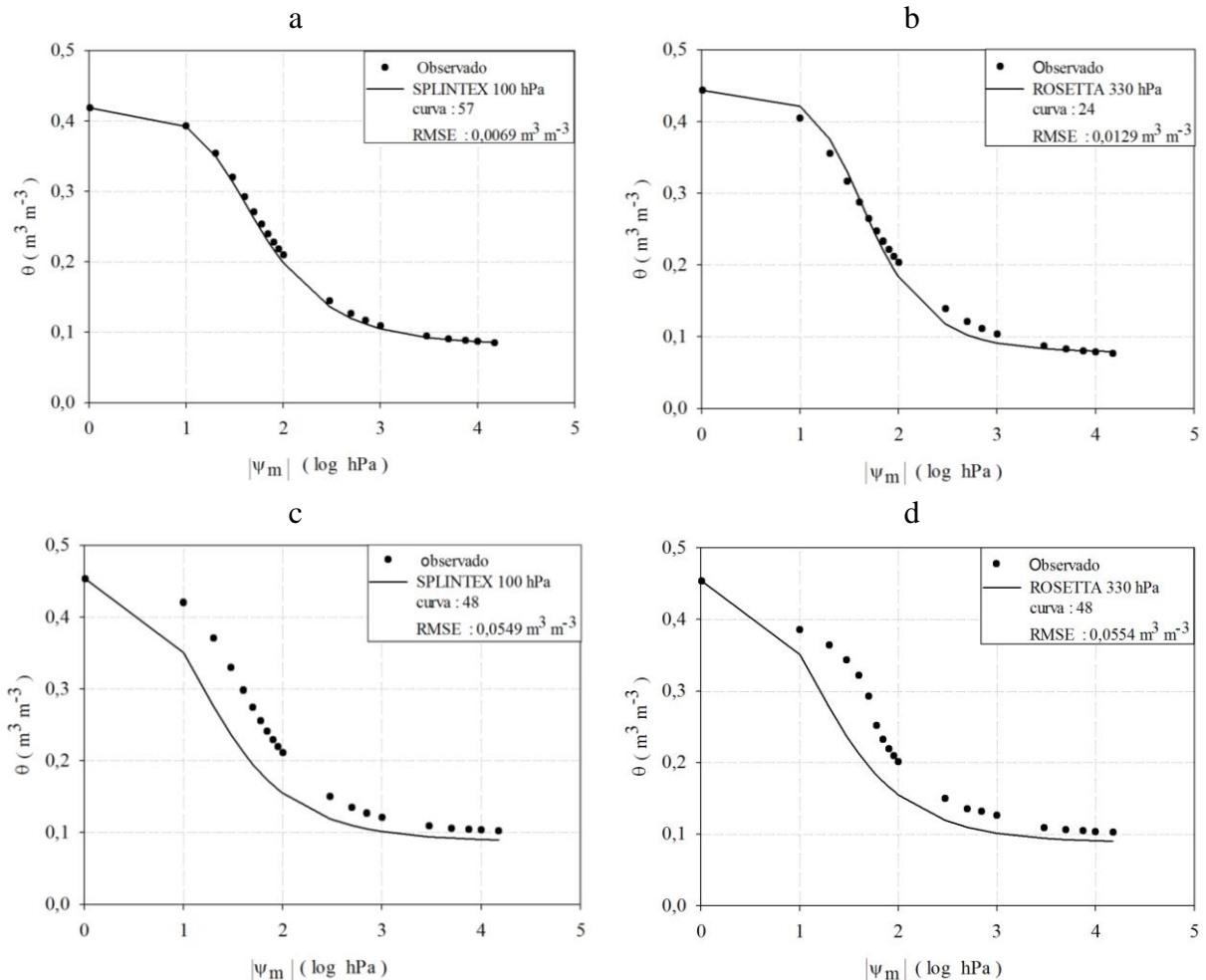


Figura 5. Gráficos da CRA para o solo arenoso com os valores observados e simulados: (a) menor RMSE (melhor ajuste) com o *Splintex* 100 hPa; (b) menor RMSE (melhor ajuste) com o *Rosetta* 330 hPa; (c) maior RMSE (pior ajuste) com o *Splintex* 100 hPa; e (d) maior RMSE (pior ajuste) com o *Rosetta* 330 hPa.

Um fator importante destacado por Tomasella & Hodnett (2004) refere-se a química do solo. Em Latossolos e Nitossolos, os sesquióxidos de Fe e Al desempenham papel importante como agentes de minerais de argila de carga negativa de ligação, criando micro-agregados estáveis dentro da gama de tamanhos de lodo de areia fina, resultando em proporção significativa de água dentro dos micro-agregados. Portanto, o $d\theta/d\psi_m$ da CRA

tende a zero a partir de altos valores de $|\psi_m|$, propiciando queda brusca da umidade, coincidindo com o valor da entrada de ar nos poros do solo.

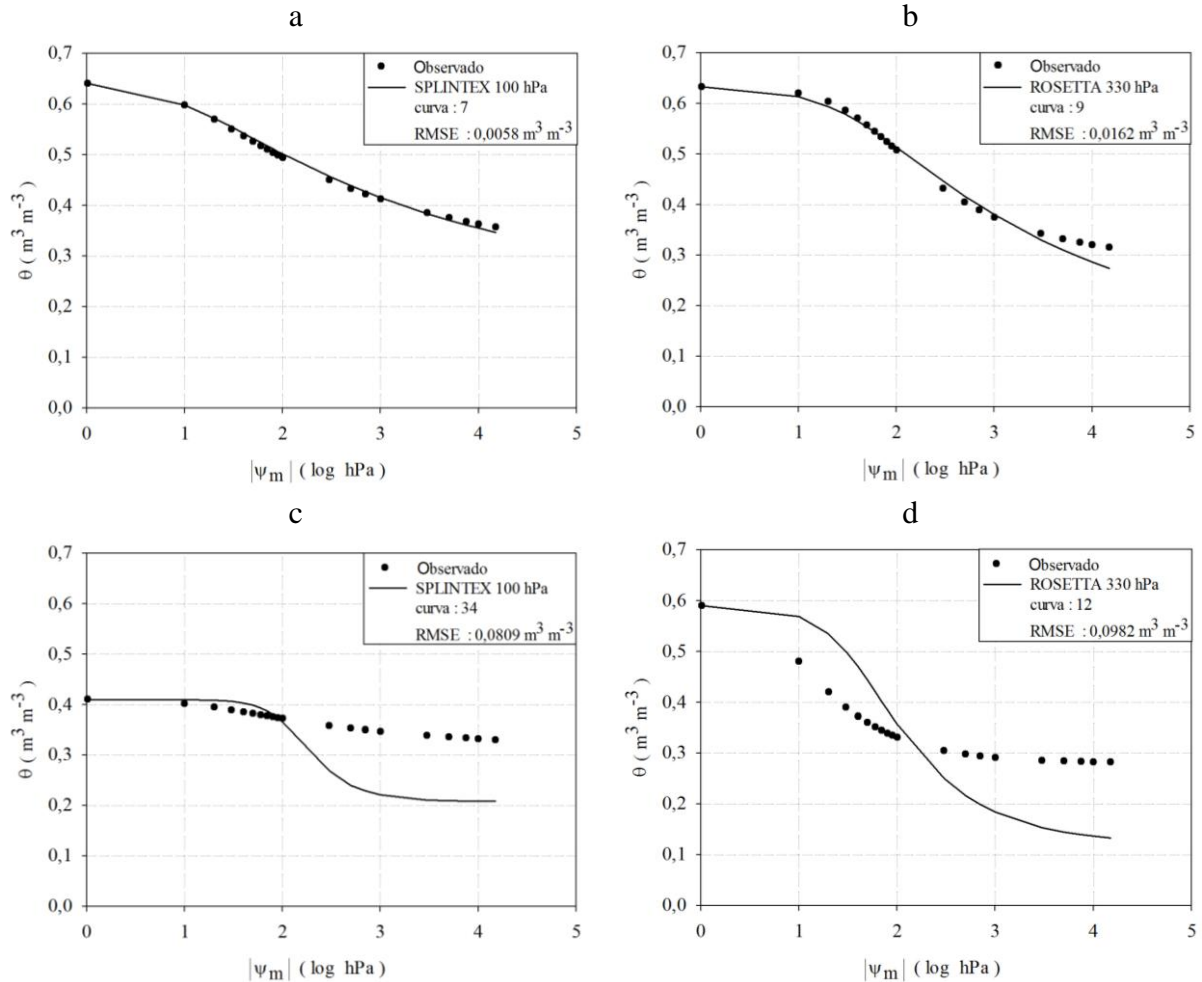


Figura 6. Gráficos da CRA para solo argiloso com os valores observados e simulados: (a) menor RMSE (melhor ajuste) com o *Splintex* 100 hPa; (b) menor RMSE (melhor ajuste) com o *Rosetta* 330 hPa; (c) maior RMSE (pior ajuste) com o *Splintex* 100 hPa; e (d) maior RMSE (pior ajuste) com o *Rosetta* 330 hPa.

O desempenho das FPT's podem depender fortemente da base de dados que foram utilizados para a calibração e avaliação. Como mencionado por Abbasi et al. (2011), que utilizaram o *Rosetta* para a simulação dos parâmetros da eq.(1). Os autores atribuíram que a razão para o baixo desempenho da estimativa do conteúdo relativo de água, pode estar atrelada com as amostras de solo analisadas possuírem características distintas dos conjuntos das FPT's utilizadas.

Argumenta-se também que o baixo desempenho das FPT's desenvolvidas com parâmetros físicos de solos de regiões de clima temperado, quando aplicada em outras condições, ocorre por apresentar alto teor de argila de Latossolos, com frequência superior a 60% em solos de clima tropical. As FPT's desenvolvidas para solos de clima temperado, muitas vezes não cobrem esse intervalo, apresentando variações entre 5 a 60% s de argila.

Outro fator é a utilização do par de valores de umidade e $|\psi_m|$ na simulação das FPT's, que podem aumentar a veracidade da simulação. Shaap et al. (2001) descrevem nos seus estudos que as FPT's apresentaram melhores desempenhos quando foram utilizados mais preditores na sua simulação, com valores de RMSE diminuindo de 0,078 a 0,044 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Vantagem que merece destaque na simulação do *Splintex*, em relação *Rosetta*, já que o par de valores de umidade e tensão, utilizado como parâmetro de entrada, pode ser escolhido entre as tensões de 0 a 15000 hPa. O par pode ser obtido pela mesa tensão ou funil de Haines, de fácil obtenção. No *Rosetta* as tensões são específicas em 330 ou 15000 hPa, necessitando-se do uso da câmara de Richards.

3.3.3. ANÁLISE DO DESEMPENHO DA SIMULAÇÃO *Splintex* e *Rosetta* PARA AS FAIXAS ÚMIDAS E SECAS DA CRA

Na (Tabela 5), são demonstrados os indicadores estatísticos na predição da umidade volumétrica, em suas respectivas tensões. Nota-se que a maior variabilidade dos erros (RMSE e MAE) ocorreu em baixas tensões, diminuindo sequencialmente em altas tensões.

O desempenho de *Splintex* 100 e 60 hPa foram similares no solo arenoso, apresentando RMSE de 0,0242 a 0,0380 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ em baixas tensões de 0,0334 a 0,0146 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ em altas tensões (Figura 7). Houve decréscimo nos valores de RMSE, com o aumento da tensão (parte seca da CRA) corroborando com Medeiros et al. (2014), quando avaliaram FPT's existentes em base paramétrica, aplicando em solos com média de 0,530 kg kg^{-1} de argila no estado do Pará, Brasil. Os autores verificaram RMSE elevado nas tensões de 0 até 100 hPa, e decréscimo da tensão 330 para 15000 hPa.

O desempenho do *Rosetta*, no solo arenoso, apresentou menores erros entre os intervalos de 0 a 100 hPa, mas nos pontos extremos entre essas tensões apresentou valores muito próximos com as simulações realizadas com o *Splintex* 100 e 60 hPa. Em altas tensões o desempenho do *Rosetta* foi o pior entre as quatro validações realizadas, apresentando erros sistemáticos superiores em comparação com *Splintex*.

Tabela 5. Indicadores estatísticos, referente a umidade volumétrica nas respectivas tensões, nos 60 pontos amostrais do solo arenoso e 43 pontos amostrais do solo argiloso.

Estatística Descritiva	Potencial Matricial da Água no Solo (hPa)											
	10	30	60	100	300	700	1000	3000	5000	7500	10000	15000
Solo Arenoso – Splintex 30 hPa												
θ	0,3862	0,2781	0,2080	0,1690	0,1206	0,1040	0,0995	0,0911	0,0893	0,0881	0,0875	0,0869
RMSE	0,0223	0,0460	0,0520	0,0512	0,0410	0,0314	0,0277	0,0190	0,0166	0,0154	0,0150	0,0147
MAE	0,0163	0,0416	0,0493	0,0482	0,0375	0,0283	0,0248	0,0167	0,0145	0,0131	0,0125	0,0119
r	0,6430	0,5408	0,1347	-0,321	-0,474	-0,339	-0,241	0,1010	0,1680	0,1939	0,2177	0,2492
Solo Arenoso – Splintex 60 hPa												
θ	0,3944	0,2903	0,2194	0,1771	0,1263	0,1069	0,1018	0,0922	0,0900	0,0889	0,0882	0,0875
RMSE	0,0224	0,0356	0,0387	0,0396	0,0346	0,0278	0,0249	0,0179	0,0159	0,0150	0,0147	0,0145
MAE	0,0170	0,0280	0,0365	0,0381	0,0322	0,0252	0,0224	0,0158	0,0138	0,0128	0,0123	0,0118
r	0,4184	0,2233	0,5257	0,4840	0,3002	0,1121	0,1210	0,1495	0,1804	0,1839	0,2041	0,2440
Solo Arenoso – Splintex 100 hPa												
θ	0,3935	0,2927	0,2220	0,1807	0,1267	0,1072	0,1020	0,0926	0,0901	0,0889	0,0882	0,0875
RMSE	0,0242	0,0368	0,0379	0,0380	0,0334	0,0271	0,0244	0,0178	0,0159	0,0151	0,0148	0,0146
MAE	0,0184	0,0279	0,0349	0,0366	0,0314	0,0248	0,0221	0,0157	0,0139	0,0128	0,0123	0,0119
r	0,3008	0,0182	0,4473	0,6035	0,5642	0,3309	0,2950	0,1488	0,1501	0,1433	0,1658	0,2039
Solo Arenoso – Rosetta 330 hPa												
θ	0,4099	0,3138	0,2286	0,1775	0,1126	0,0904	0,0848	0,0751	0,0729	0,0719	0,0714	0,0707
RMSE	0,0196	0,0219	0,0331	0,0407	0,0442	0,0403	0,0383	0,0322	0,0300	0,0286	0,0277	0,0268
MAE	0,0148	0,0189	0,0284	0,0388	0,0441	0,0400	0,0380	0,0310	0,0283	0,0264	0,0255	0,0243
r	0,7692	-0,302	0,3931	0,8691	0,9708	0,9229	0,8971	0,5418	0,3838	0,2617	0,2308	0,2449
Solo Argiloso – Splintex 30 hPa												
θ	0,5000	0,4534	0,3589	0,3184	0,3130	0,2956	0,2951	0,2946	0,2937	0,2936	0,2935	0,2878
RMSE	0,0391	0,0347	0,0425	0,0748	0,0650	0,0696	0,0665	0,0615	0,0578	0,0569	0,0561	0,0560
MAE	0,0297	0,0277	0,0383	0,0662	0,0556	0,0578	0,0544	0,0489	0,0468	0,0471	0,0465	0,0472
r	0,9336	0,9351	0,8688	0,6847	0,5174	0,4765	0,4784	0,4409	0,4689	0,4736	0,4703	0,4593
Solo Argiloso – Splintex 60 hPa												
θ	0,4965	0,4337	0,3872	0,3420	0,2935	0,2857	0,2841	0,2621	0,2616	0,2614	0,2614	0,2613
RMSE	0,0300	0,0355	0,0209	0,0401	0,0683	0,0665	0,0650	0,0621	0,0622	0,0628	0,0634	0,0654
MAE	0,0226	0,0291	0,0137	0,0368	0,0589	0,0539	0,0517	0,0475	0,0480	0,0488	0,0499	0,0524
r	0,9126	0,8664	0,9257	0,8733	0,6601	0,6027	0,6071	0,5755	0,5710	0,5488	0,5346	0,4992
Solo Argiloso – Splintex 100 hPa												
θ	0,4854	0,4451	0,4148	0,3794	0,3015	0,2896	0,2756	0,2583	0,2413	0,2529	0,2474	0,2362
RMSE	0,0302	0,0421	0,0298	0,0163	0,0487	0,0555	0,0557	0,0551	0,0572	0,0567	0,0576	0,0601
MAE	0,0225	0,0351	0,0252	0,0101	0,0413	0,0444	0,0448	0,0451	0,0480	0,0473	0,0485	0,0512
r	0,9023	0,8267	0,8950	0,9457	0,8238	0,7321	0,7247	0,6633	0,6158	0,6189	0,6001	0,5502
Solo Argiloso – Rosetta 330 hPa												
θ	0,4846	0,4546	0,4206	0,3726	0,3112	0,2710	0,2558	0,2150	0,1995	0,1890	0,1823	0,1733
RMSE	0,0274	0,0373	0,0311	0,0271	0,0402	0,0558	0,0614	0,0764	0,0824	0,0875	0,0911	0,0942
MAE	0,0174	0,0264	0,0235	0,0227	0,0337	0,0499	0,0566	0,0730	0,0792	0,0846	0,0883	0,0914
r	0,9459	0,8618	0,8647	0,8850	0,9113	0,9108	0,9225	0,8935	0,8644	0,8373	0,8146	0,7872

θ : média dos valores estimados ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); RMSE: *root mean square error* ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); MAE: *mean absolute error* ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); r: coeficiente de correlação.

O mesmo ocorreu para o solo argiloso, maiores valores de RMSE de 0 a 60 hPa, seguido de um decréscimo até 100 hPa, e posteriormente um crescimento contínuo em todas as simulações. O desempenho do *Rosetta* foi o pior em relação as demais simulações em altas tensões, apresentando valores elevados de RMSE para solo arenoso e argiloso. Esse baixo desempenho para solo argiloso pode estar correlacionado com os óxidos de Ferro e Alumínio e com a alta superfície específica presentes nos solos argilosos. Botula et al. (2012) indicaram em seus estudos que o óxido de ferro (Fe) teve um grande potencial para reduzir a incerteza da FPT para a predição de parâmetros de retenção de água dos solos tropicais.

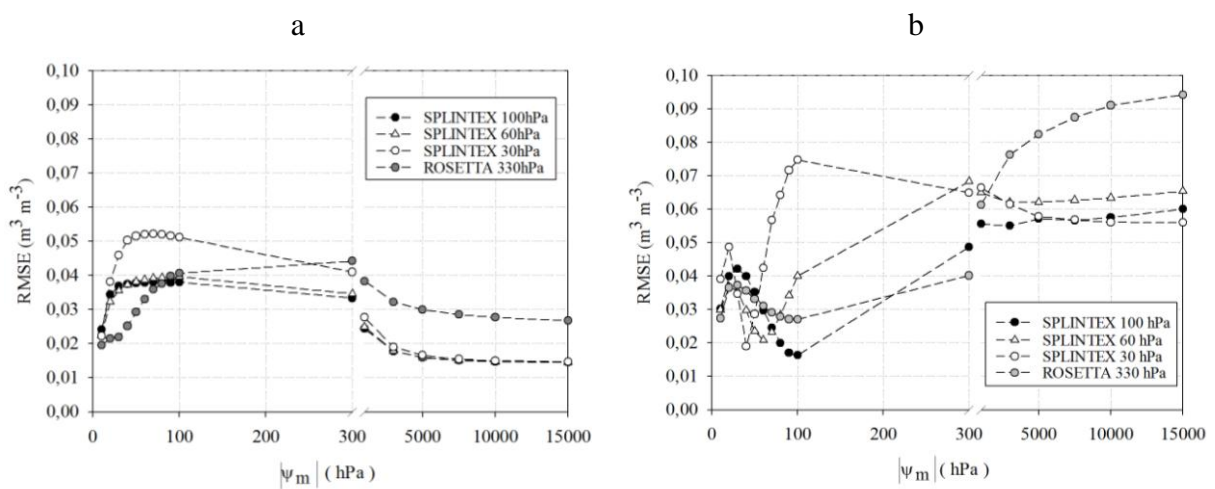


Figura 7. Valores do RMSE nas respectivas tensões avaliadas: (a) 60 pontos amostrais para solo arenoso; e (b) 43 pontos amostrais para solo argiloso.

A partir dos valores obtidos na eq.(8), comparou-se o desempenho do *Splintex* na predição dos valores na parte úmida (baixas tensões) e na parte seca (altas tensões) da CRA (Figura 8). Com os resultados, o usuário pode escolher a melhor opção para realizar a simulação da CRA em função de sua necessidade. Para Conservação do Solo a parte úmida da CRA é, na maioria, suficiente. Contudo, em estudos de Física do Solo tem-se a necessidade de se analisar todo o comportamento da CRA, ou separadamente as partes úmida ou seca.

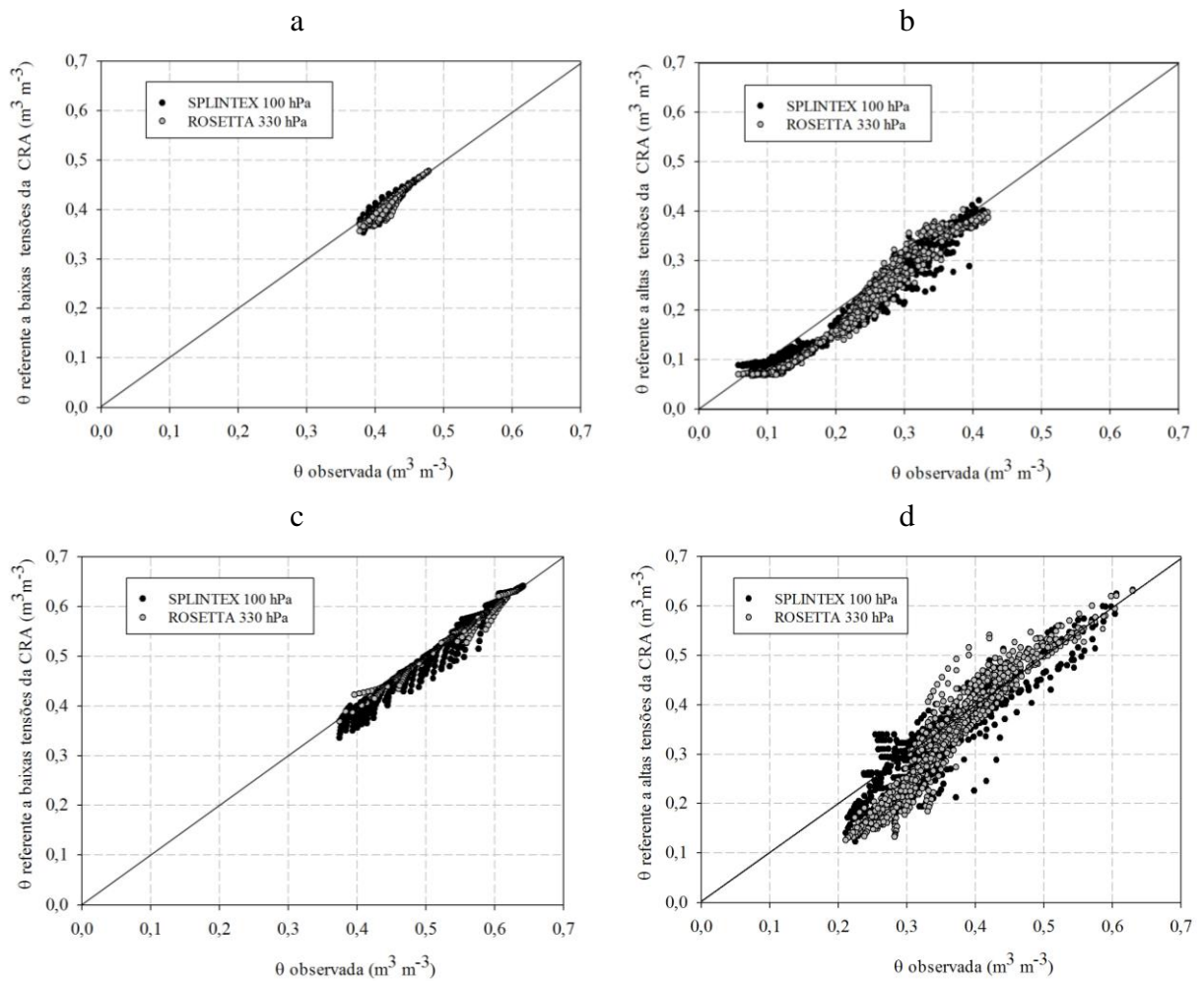


Figura 8. Análise da umidade volumétrica do solo no ponto de inflexão com os valores observados e simulados com o *Splintex* e *Rosetta*: (a) parte úmida da CRA para solo arenoso; (b) parte seca da CRA para solo arenoso; (c) parte úmida da CRA para solo argiloso; e (d) parte seca da CRA para solo argiloso.

3.5.4. ANÁLISE DO DESEMPENHO DA SIMULAÇÃO NO *Splintex* e *Rosetta* DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO SOLO

Com os parâmetros da eq.(1), observados e simulados no *Splintex* e *Rosetta*, analisou-se alguns parâmetros hidráulicos para o solo arenoso. Ressalta-se que para o solo argiloso não foi possível realizar algumas avaliações, devido a não existência de valores de K no banco de dados utilizado.

3.5.4.1. Condutividade hidráulica do solo saturado

Os valores simulados da K com o *Splintex* e *Rosetta*, indicaram baixa capacidade preditiva, traduzida pelos elevados valores de RMSE e MAE. Houve tendência de super ou subestimar, não apresentando bons índices (precisão e exatidão) em comparação aos dados observados (Tabela 6) para o solo arenoso.

Tabela 6. Estatística descritiva referente à condutividade hidráulica do solo saturado (K) observada e estimadas com o *Splintex* e *Rosetta*.

FPT	Estatística Descritiva							
	Min	Max	X	DP	MAE	RMSE	r	CV
	----- m s ⁻¹ x (3,6 x 10 ⁶) -----							%
Solo Arenoso								
Dados observados	5,18	274,80	42,54	41,50	-	-	-	97,57
<i>Splintex</i> 30 hPa	109,88	145,55	124,21	6,99	87,36	91,06	0,2115	5,62
<i>Splintex</i> 60 hPa	109,88	145,55	124,21	6,99	87,36	91,06	0,2114	5,62
<i>Splintex</i> 100 hPa	109,88	145,55	124,21	6,99	87,36	91,06	0,2115	5,62
<i>Rosetta</i> 330 hPa	38,29	157,22	90,06	26,74	56,67	65,36	0,1757	29,69

DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação; x: média dos valores estimados; RMSE: *root mean square error*; MAE: *mean absolute error*; r: coeficiente de correlação.

Os valores médios obtidos da K pelo *Splintex* nos potenciais 30; 60 e 100 hPa não diferiram-se, mas em comparação com os valores observados superestimaram (Figura 9). Logo a determinação da K é altamente dependente da estrutura do solo.

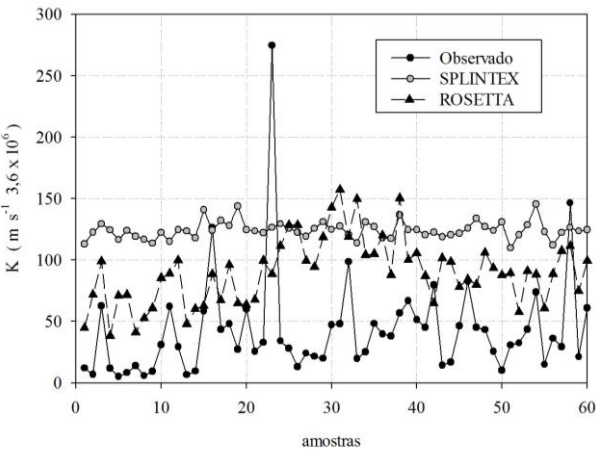


Figura 9. Simulação da condutividade hidráulica do solo saturado (K) com o *Splintex* e *Rosetta*, em comparação com os 60 pontos amostrais observados do solo com característica arenosa.

Contudo, acrescenta-se que o baixo desempenho na simulação de K , com o *Splintex* e *Rosetta*, se deve ao fato dos valores observados de K terem sido determinados em campo, a partir da metodologia do perfil instantâneo, adaptada pela técnica proposta por Libardi et al. (1980). No banco de dados de K presente no *Splintex* provém do trabalho de Rodas (1970), que utilizou a metodologia do permeâmetro de carga constante na determinação de K . No banco de dados do *Rosetta* não deve haver também valores de K determinados a partir da metodologia de Libardi et al. (1980), tornando difícil a avaliação do desempenho da simulação em distintas metodologias de determinação de K .

3.5.4.2. Capacidade de água disponível (CAD)

Os valores de θ_{cc} estimados a partir do *Splintex* e *Rosetta* subestimaram os valores observados (Tabela 7). Os resultados corroboram com Oliveira et al. (2002), em estudos para solos arenosos no estado de Pernambuco, apresentando valores similares de erro para simulação da θ_{cc} . Entretanto, o *Splintex* proporcionou valores médios mais próximos do observado do que o *Rosetta*.

Tabela 7. Estatística descritiva referente à umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) observada e estimada com o *Splintex* e *Rosetta*.

FPT	Estatística Descritiva							
	Min	Max	X	DP	MAE	RMSE	r	CV
	----- m ³ m ⁻³ -----							
	Solo Arenoso							
Dados observados	0,2274	0,2853	0,2510	0,0144	-	-	-	5,72
<i>Splintex</i> 30 hPa	0,2076	0,2508	0,2264	0,0080	0,0258	0,0305	-0,2634	3,55
<i>Splintex</i> 60 hPa	0,2107	0,2485	0,2278	0,0072	0,0242	0,0288	-0,1907	3,18
<i>Splintex</i> 100 hPa	0,2113	0,2477	0,2279	0,0070	0,0240	0,0285	-0,1356	3,06
<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,1970	0,2285	0,2114	0,0075	0,0396	0,0406	0,8558	3,55
	Solo Argiloso							
Dados observados	0,2911	0,5227	0,3900	0,0496	-	-	-	12,723
<i>Splintex</i> 30 hPa	0,2427	0,5285	0,3521	0,0797	0,0534	0,0590	0,8500	22,64
<i>Splintex</i> 60 hPa	0,2458	0,5311	0,3469	0,0697	0,0496	0,0556	0,8765	20,09
<i>Splintex</i> 100 hPa	0,2481	0,5283	0,3493	0,0705	0,0462	0,0538	0,8808	20,17
<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,2726	0,4916	0,3446	0,0538	0,0463	0,0496	0,9257	15,60

DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação; x: média dos valores estimados; RMSE: *root mean square error*; MAE: *mean absolute error*; r: coeficiente de correlação.

O melhor desempenho na determinação da θ_{cc} , foi obtido com a simulação do *Rosetta* para o solo argiloso, com de correlação de 0,8558 e RMSE de 0,0406 m³ m⁻³. No entanto a simulação realizada com o *Splintex* proporcionou o melhor resultado de exatidão

para o solo arenoso (menores valores de RMSE e MAE). Ressaltando-se uma pequena diferença de 0,0042 mm de RMSE e de 0,0001 mm de MAE, entre a simulação *Rosetta* e *Splintex* 100 hPa (Tabela 7).

A distribuição dos valores observados e estimados de θ_{cc} foram plotados para cada ponto amostral (Figura 10). Percebe-se que a distribuição dos pontos para o solo arenoso segue uniforme, com CV variando entre 3,06 e 5,72%. Ao contrario para o solo argiloso, apresentando distribuições com um aumento e decréscimo, variando os valores de θ_{cc} entre 0,2427 a 0,5311 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

Comparando com os estudos de Tomasella & Hodnett (2004) que avaliaram algumas FPT's paramétricas para solos do Brasil, os resultados de RMSE e EM para a FPT de van den Berg et al. (1997) foram de 0,085 e 0,046 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na tensão de 100 hPa. Na FPT de Hodnett & Tomasella (2002) de 0,066; -0,005 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na tensão de 100 hPa, e 0,084 e 0,045 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para tensão de 330 hPa. Na FPT de Tomasella et al. (2000) os resultados obtidos foram de 0,060 e -0,043 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na tensão de 100 hPa, e 0,052 e 0,016 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na tensão de 330 hPa. Os resultados mostraram que para predição foram superiores ao deste estudo.

Ressalta-se que a determinação da θ_{cc} foi obtida com a eq.(5), diferindo de outros estudos, que padronizam valores específicos de θ_{cc} à tensões variáveis (60, 100, 330 hPa, entre outras). Tomasella et al. (2003) adotaram duas tensões para prever θ_{cc} , resultando em uma variabilidade dos resultados.

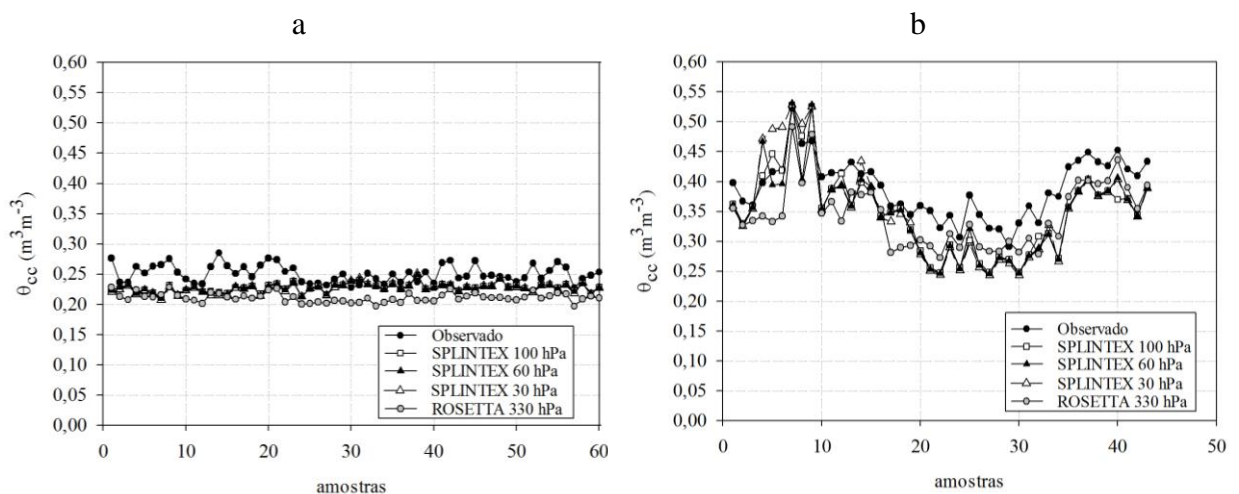


Figura 10. Umidade volumétrica na capacidade de campo, com os valores observados e simulados com o *Splintex* e *Rosetta*: (a) 60 pontos amostrais para solo arenoso; e (b) 43 pontos amostrais para solo argiloso.

Outro ponto determinado foi a θ_{pmp} , em que a porcentagem de água é menor, como filmes retidos nas superfícies dos sólidos, designados pelo fenômeno da adsorção. Observou-se que os valores de θ_{pmp} (Tabela 8), estimados nas tensões 30, 60 e 100 hPa pelo *Splintex* proporcionaram os melhores resultados de exatidão para ambos os solos (menores valores de RMSE e MAE).

Tabela 8. Estatística descritiva referente à umidade volumétrica observada no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) e de suas previsões utilizando-se o *Splintex* e *Rosetta*.

FPT	Estatística Descritiva							
	Min	Max	X	DP	MAE	RMSE	r	CV
	----- m ³ m ⁻³ -----							%
Solo Arenoso								
Dados observados	0,0576	0,1199	0,0942	0,0133	-	-	-	14,06
<i>Splintex</i> 30 hPa	0,0763	0,0941	0,0868	0,0036	0,0118	0,0146	0,2881	4,18
<i>Splintex</i> 60 hPa	0,0770	0,0945	0,0872	0,0036	0,0117	0,0144	0,2834	4,08
<i>Splintex</i> 100 hPa	0,0775	0,0946	0,0872	0,0035	0,0118	0,0146	0,2461	3,98
<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,0666	0,0745	0,0707	0,0015	0,0244	0,0268	0,2804	2,07
Solo Argiloso								
Dados observados	0,2106	0,3569	0,2683	0,0348	-	-	-	12,98
<i>Splintex</i> 30 hPa	0,1588	0,3923	0,2656	0,0645	0,0462	0,0551	0,5051	24,29
<i>Splintex</i> 60 hPa	0,0883	0,3749	0,2480	0,0728	0,0508	0,0641	0,5364	29,33
<i>Splintex</i> 100 hPa	0,1237	0,3640	0,2404	0,0648	0,0498	0,0588	0,5923	26,96
<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,1264	0,2855	0,1768	0,0363	0,0914	0,0942	0,7897	20,54

DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação; x: média dos valores estimados; RMSE: *root mean square error*; MAE: *mean absolute error*; r: coeficiente de correlação.

Nota-se que a variação dos valores foram semelhantes, e menores, comparando com o desempenho obtido pelo *Rosetta*. Ressalta-se que em ambas FPT's utilizadas houve baixa precisão, com maior coeficiente de correlação obtida no *Rosetta* para solo argiloso. Para os valores de RMSE simulados como *Splintex* no solo arenoso, foram inferiores aos obtidos por Oliveira et al. (2002). Patil et al. (2013) desenvolveram FPT's para prever a θ_{cc} e θ_{pmp} em solo argiloso da Índia. Concluíram que a eq.(1) ajustou-se bem com RMSE e MAE de 0,0249 e 0,0188 m³ m⁻³ e 0,9489 de correlação.

Os valores simulados subestimaram os valores observados para ambos os solos (Figura 11). No solo argiloso os valores de CV foram maiores comparando com o solo arenoso, e a simulação realizada com o *Splintex* apresentou maior exatidão, comparando com a simulação do *Rosetta*.

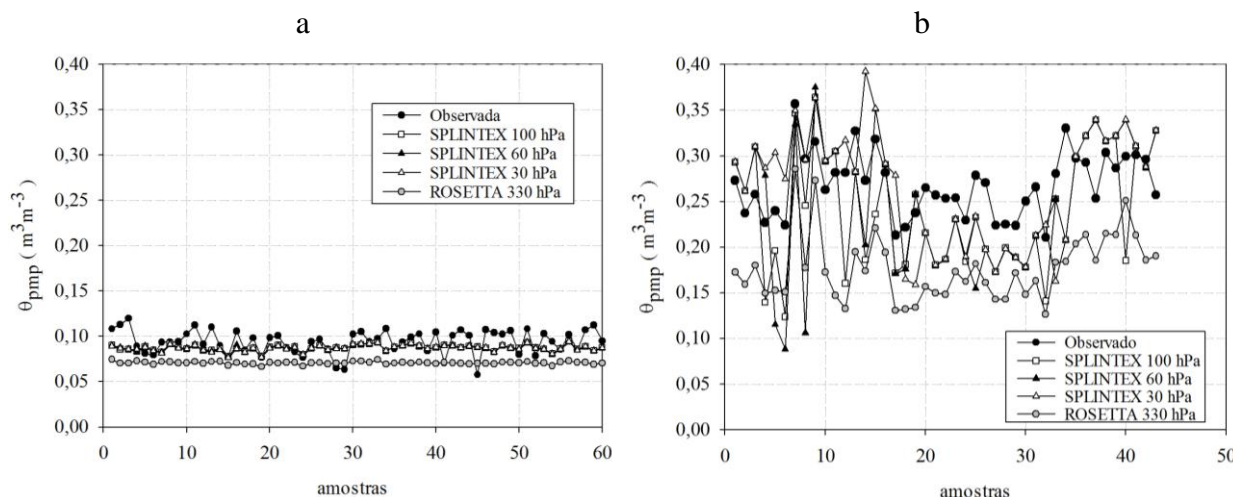


Figura 11. Umidade volumétrica no ponto de murchamento permanente do solo com os valores observados e simulados com o *Splintex* e *Rosetta*: (a) 60 pontos amostrais para solo arenoso; e (b) 43 pontos amostrais para solo argiloso.

Tomasella & Hodnett (2004) avaliaram algumas FPT's paramétricas na tensão de 15000 hPa, para solos do Brasil, e tiveram como resultados de RMSE e EM para FPT de van den Berg et al. (1997) valores de 0,073 e 0,033 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, para FPT de Tomasella et al. (2000), que apresentou o menor erro, valores de 0,066 e -0,008 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, e na FPT de Hodnett & Tomasella (2002) valores de 0,065 e -0,004 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Em solos no Baixo Congo Botula et al. (2012) avaliaram uma serie de FPT's publicadas na literatura para prever a retenção de água do solo, entre elas a FPT paramétrica de Hodnett & Tomasella (2002) resultou os menores RMSE de 0,0341 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para 330 hPa e 0,0450 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para 15000 hPa.

Os resultados mostraram que o desempenho do *Splintex* nas tensões 30, 60 e 100 hPa para θ_{pmp} foram melhores que os resultados da FPT utilizada por Tomasella & Hodnett (2004).

Na (Tabela 9) encontra-se a estatística descritiva para os valores da capacidade de água disponível (CAD) na profundidade de 0,75 a 0,85 m para o solo arenoso, e em média de 0,20 a 0,30 para o solo argiloso. Verificou-se que na simulação do *Splintex* o coeficiente de correlação foi negativo, ao contrário da simulação com o *Rosetta*.

Já os valores dos erros foram similares entre as simulações para o solo arenoso, exceto para o *Rosetta* que apresentou melhor desempenho (RMSE = 2,47 mm e $r = 0,5731$), diferindo 0,51mm de erro da simulação *Splintex* 100 hPa. Valores esses que foram inferiores, ao estudo de Tomasella & Hodnett (2004), que adotou FPT's paramétricas existentes, para avaliar a água disponível (AD) em solos do Brasil. Como resultado os autores compararam

dois níveis de tensão para θ_{cc} a 100 e 330 hPa, e 15000 hPa para θ_{pmp} . Os resultados de RMSE variaram entre 0,055 e 0,081 m³ m⁻³. Transformando-se esses erros em valores em lâmina de água para a mesma camada (100 mm), os valores sistemáticos foram superiores ao encontrado no presente estudo.

Tabela 9. Estatística descritiva da capacidade de água disponível (CAD) observada e estimada com o *Splintex* e *Rosetta*.

FPT	Estatística Descritiva							
	Min	Max	X	DP	MAE	RMSE	r	CV
	----- m m -----							
	Solo Arenoso							
Dados observados	11,72	21,45	15,67	2,22	-	-	-	14,15
<i>Splintex</i> 30 hPa	12,63	16,11	13,96	0,6495	2,37	2,98	-0,2569	4,65
<i>Splintex</i> 60 hPa	12,85	15,93	14,05	0,5895	2,27	2,87	-0,1762	4,19
<i>Splintex</i> 100 hPa	12,88	15,88	14,07	0,5762	2,24	2,84	-0,1385	4,10
<i>Rosetta</i> 330 hPa	12,32	15,65	14,06	0,7412	1,92	2,47	0,5731	5,27
	Solo Argiloso							
Dados observados	4,49	19,57	12,18	3,55	-	-	-	29,16
<i>Splintex</i> 30 hPa	3,93	21,65	8,65	5,12	4,86	5,76	0,4827	59,24
<i>Splintex</i> 60 hPa	4,08	30,76	9,89	6,99	5,16	6,12	0,5748	70,77
<i>Splintex</i> 100 hPa	4,77	29,49	10,89	7,10	4,91	5,85	0,5882	65,22
<i>Rosetta</i> 330 hPa	12,41	21,98	16,78	2,81	4,62	4,98	0,8432	16,77

DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação; x: média dos valores estimados; RMSE: *root mean square error*; MAE: *mean absolute error*; r: coeficiente de correlação.

Valores similares de AD foram encontrados por Costa et al. (2013) em solos na região de Santa Catarina, na camada subsuperficial, utilizando nas FPT's os mesmos cinco parâmetros de entrada utilizados na simulação do *Splintex*, resultando no valor médio de RMSE de 0,02 m³ m⁻³, multiplicado para mesma camada no presente estudo.

Na (Figura 12) são apresentados os valores de CAD para cada ponto amostral. Para o solo arenoso os valores apresentaram distribuição uniforme entre as simulações, ao contrário dos observados, confirmando a tendência das FPT's em não estimarem valores extremos. Para para o solo argiloso, as distribuições foram mais irregulares, demonstrando que a CAD está atrelada à outros fatores da estrutura do solo que não são contemplados na FPT's, como: continuidade, forma e geometria dos microporos do solo.

Os resultados obtidos nas simulações indicam que o *Splintex* e o *Rosetta* podem ser uma ótima alternativa na simulação da CAD para solos arenosos, aplicado aos estudos que envolvam a hidrologia, conservação do solo ou gerenciamento da irrigação. Contudo, para solos argilosos, elas devem ser utilizadas com cuidado, a depender da confiabilidade exigida

no interesse específico do estudo. Andrade & Stone (2011) acrescentam que, em campo, a determinação da CAD requer tempo e custos elevados. Sua estimativa, no entanto, por intermédio de FPT's pode ser uma alternativa econômica, em curto prazo e de reconhecida viabilidade técnica.

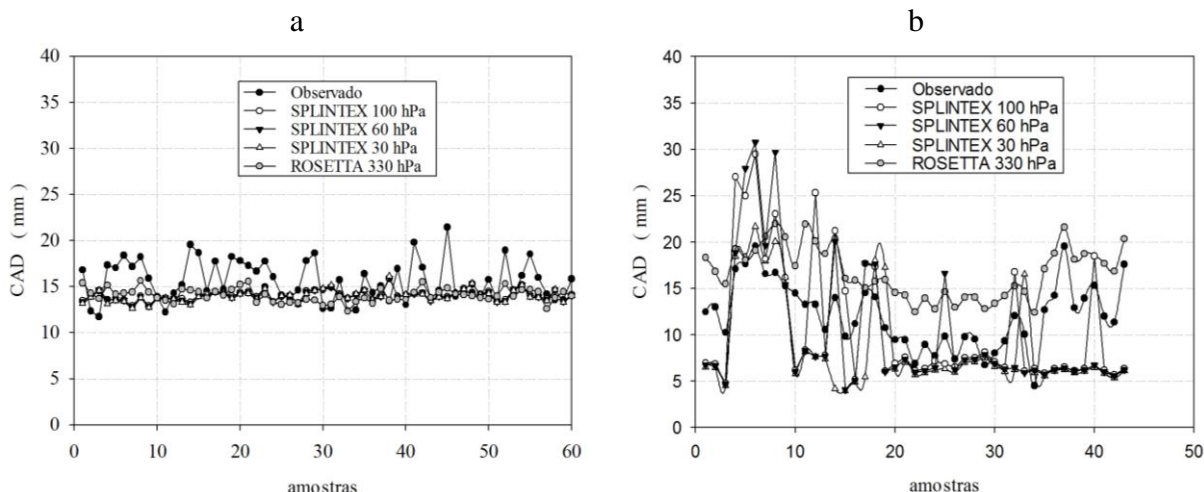


Figura 12. Valores observados e simulados com o *Splintex* e *Rosetta* para a capacidade de água disponível no solo (CAD): (a) 60 pontos amostrais para solo arenoso; e (b) 43 pontos amostrais para solo argiloso.

3.3.4.3. Porosidade de aeração

Outro atributo físico do solo importante a ser determinado foi a porosidade livre de água, também conhecida como a porosidade de aeração (α_{ar}). Percebe-se que o desempenho *Splintex*, nas tensões de 60 e 100 hPa, foi o que apresentou os melhores ajustes com menores erros de (RMSE, MAE) para o solo arenoso, ao contrário com a simulação realizada com o *Rosetta*, que apresentou os maiores erros de (RMSE, MAE) (Tabela 10).

No solo argiloso, o *Rosetta* apresentou o melhor desempenho (RMSE e r), com valor de $0,0498 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e aproximadamente 0,88 de correlação. Entretanto na simulação com *Splintex* observou uma baixa variabilidade entre os resultados para 60 e 100 hPa avaliadas, ressaltando melhor exatidão para simulação *Splintex* 100 hPa.

Para o solo arenoso (Figura 13a), observou-se distribuição uniforme entre os dados simulados em relação aos dados observados, mas com superestimativa para ambas simulações. Para o solo argiloso (Figura 13b), ambas simulações apresentaram maior irregularidade entre os resultados, com maior evidência para o *Rosetta*.

Tabela 10. Estatística descritiva referente à porosidade de aeração (α_{ar}) observada e simulada com o *Splintex* e *Rosetta*.

FPT	Estatística Descritiva							
	Min	Max	X	DP	MAE	RMSE	r	CV
	----- m ³ m ⁻³ -----							%
Solo Arenoso								
Dados observados	0,1317	0,2408	0,1868	0,0234	-	-	-	12,54
<i>Splintex</i> 30 hPa	0,1894	0,2309	0,2111	0,0096	0,0256	0,0302	0,7036	4,57
<i>Splintex</i> 60 hPa	0,1864	0,2304	0,2098	0,0106	0,0240	0,0286	0,7462	5,04
<i>Splintex</i> 100 hPa	0,1857	0,2303	0,2096	0,0107	0,0238	0,0282	0,7728	5,12
<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,1811	0,2716	0,2262	0,0182	0,0394	0,0403	0,9436	8,03
Solo Argiloso								
Dados observados	0,0349	0,1982	0,1119	0,0376	-	-	-	29,16
<i>Splintex</i> 30 hPa	0,0960	0,2034	0,1500	0,0266	0,0536	0,0593	0,0096	59,24
<i>Splintex</i> 60 hPa	0,1040	0,2222	0,1553	0,0280	0,0498	0,0558	0,4439	70,77
<i>Splintex</i> 100 hPa	0,1069	0,2198	0,1526	0,0250	0,0462	0,0538	0,4109	65,22
<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,1015	0,2761	0,1575	0,0417	0,0465	0,0498	0,8775	16,77

DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação; x: média dos valores estimados; RMSE: root mean square error; MAE: mean absolute error; r: coeficiente de correlação.

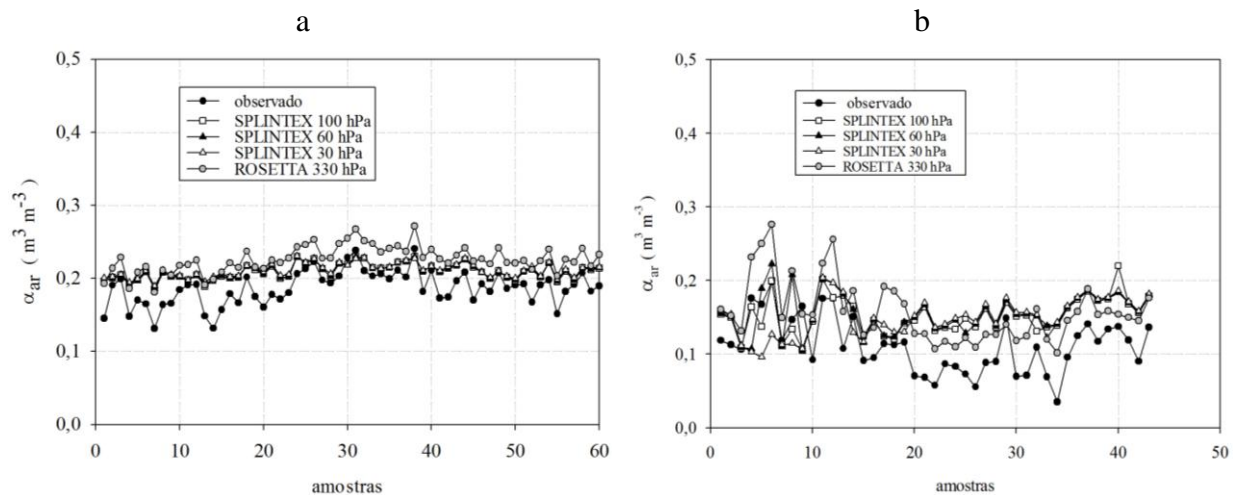


Figura 13. Valores observados e simulados com o *Splintex* e *Rosetta* para a porosidade de aeração do solo; (a) 60 pontos amostrais para solo arenoso; e (b) 43 pontos amostrais para solo argiloso.

3.3.5. DESEMPENHO DA SIMULAÇÃO DO *Splintex* e *Rosetta* PARA AS FUNÇÕES HIDRÁULICAS DO SOLO

Avaliou-se o desempenho das simulações do *Splintex* 100 hPa e *Rosetta* na determinação das funções hidráulicas do solo arenoso. Ressalta-se que o *Splintex* 100 hPa foi adotado por apresentar o melhor desempenho dentre os tratamentos *Splintex* 30, 60 e 100 hPa.

3.3.5.1. Função condutividade hidráulica do solo não saturado

Avaliando a $K(\theta)$ como uma função da umidade volumétrica, nota-se que os valores de RMSE apresentados foram menores para a simulação com o *Splintex*, com um crescimento potencial entre a θ e RMSE (Tabela 11).

Tabela 11. Estatística descritiva referente à média da função da condutividade hidráulica do solo insaturado $K(\theta)$.

		θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)						
		0,12	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
$K(\theta)$ (mm dia^{-1})	Observados	0,0001	0,0040	0,1413	1,2584	6,2402	27,317	109,41
	<i>Splintex</i> 100 hPa	0,0011	0,0269	0,5288	3,5851	15,607	52,758	159,39
	<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,0000	0,1225	1,3686	6,7167	24,479	73,582	211,72
RMSE (mm dia^{-1})	<i>Splintex</i> 100 hPa	0,0018	0,0340	0,5575	3,4039	13,287	40,902	106,12
	<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,0003	0,2304	2,0836	9,2350	29,074	75,723	169,92

RMSE: *root mean square error*; θ : umidade volumétrica.

Observa-se nos valores médios da função de $K(\theta)$ ao longo da θ , superestimativas em ambas simulações, com maior evidência para simulação realizada com o *Rosetta* a partir da θ de $0,15 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (Figura 14a). Entretanto os menores erros sistemáticos de predição (RMSE) foram obtidos para a simulação com o *Splintex* (Figura 14b).

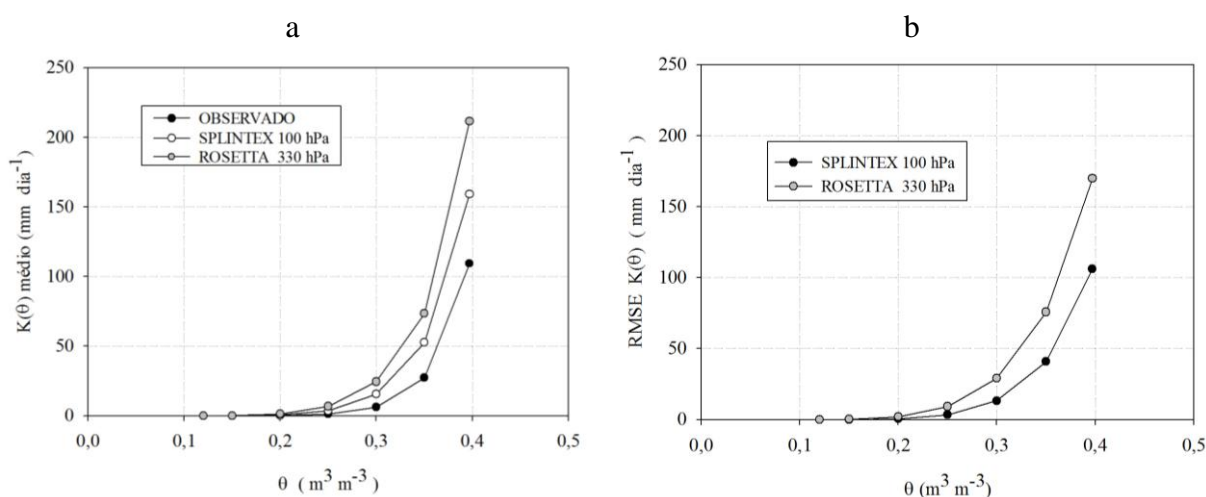


Figura 14. Função $K(\theta)$ ao longo de θ : (a) $K(\theta)$ médio para os dados observados e simulados com o *Splintex* 100 hPa e *Rosetta* 330 hPa para o solo arenoso; e (b) RMSE da simulação com o *Splintex* 100 hPa e *Rosetta* 330 hPa nas variações de θ para solo arenoso.

Manyame et al. (2007) avaliaram três FPT's na quantificação da $K(\theta)$ para solos arenosos do Níger. Os autores observaram para faixa de umidade $0,04$ a $0,1 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ valores de

$K(\theta)$ que variaram de 0 a 5,3 mm dia⁻¹, com RMSE médio de 0,26 mm dia⁻¹, superiores com o presente estudo. Como existe alta dependência entre a θ e $K(\theta)$, torna-se mais difícil determinação, principalmente em faixas altas de umidade.

Os resultados evidenciam, ao longo do crescimento da θ os valores de $K(\theta)$ e RMSE apresentam um crescimento potencial. Corroborando com os estudos de Conceição et al. (2014), que descrevem que a $K(\theta)$ depende fortemente da geometria porosa do solo e das propriedades do fluido no meio (densidade e viscosidade), que não são consideradas nas FPT's.

Abbasi et al. (2011) citam que a medição direta da $K(\theta)$ pelo método do perfil instantâneo é demorada e cara, além das altas variabilidades espaciais e temporais, aumentando o número de medições em campo. Assim, as FPT's um recurso importante para a modelagem e compreensão do balanço hídrico no campo (Manyame et al., 2007).

Avaliando-se pontualmente a condutividade hidráulica na capacidade de campo [$K(\theta_{cc})$], verificou-se que as simulações apresentaram variabilidade similar entre os erros RMSE e MAE, exceto para simulação com o *Rosetta* (Tabela 12).

Tabela 12. Estatística descritiva referente à condutividade hidráulica $K(\theta_{cc})$ na umidade volumétrica na capacidade de campo e suas simulações com o *Splintex* e *Rosetta*.

FPT	Estatística Descritiva							
	Min	Max	X	DP	MAE	RMSE	r	CV
	----- m s ⁻¹ x 10 ⁻⁹ -----							
	Solo Arenoso							
Dados observados	10,2	85,91	18,17	17,59	-	-	-	96,79
<i>Splintex</i> 30 hPa	2,91	141,51	24,23	22,04	8,01	12,28	0,8757	90,94
<i>Splintex</i> 60 hPa	2,78	135,81	23,80	21,51	7,50	11,40	0,8882	90,40
<i>Splintex</i> 100 hPa	2,84	134,81	23,75	21,46	7,38	11,24	0,8915	90,33
<i>Rosetta</i> 330 hPa	2,77	174,58	28,00	27,54	9,87	16,41	0,9208	98,36

DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação; x: média dos valores estimados; RMSE: *root mean square error*; MAE: *mean absolute error*; r: coeficiente de correlação.

Observa-se na (Tabela 12) que ocorreu o contrário para os dados observados, com CV elevado, demonstrando alta variabilidade de $K(\theta_{cc})$ no solo. A uniformidade dos valores de CV entre as simulações do *Splintex* se deve novamente a capacidade do modelo em não simular situações de extremos. A variabilidade de $K(\theta_{cc})$ estimada depende unicamente dos parâmetros simulados da eq.(1), em que os valores de K utilizados foram do experimento de Brito (2010).

Conforme observado no item anterior $[K(\theta)]$, os erros tendem a se elevar com o aumento da θ . Como a θ_{cc} apresentava valores elevados, em média de $0,2510 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para os valores observados e $0,2233 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para as simulações, os erros também apresentaram valores elevados. Outro fator relevante é a variabilidade uniforme na simulação com *Splintex* 30, 60 e 100 hPa, apresentando seguimento similar ao observado.

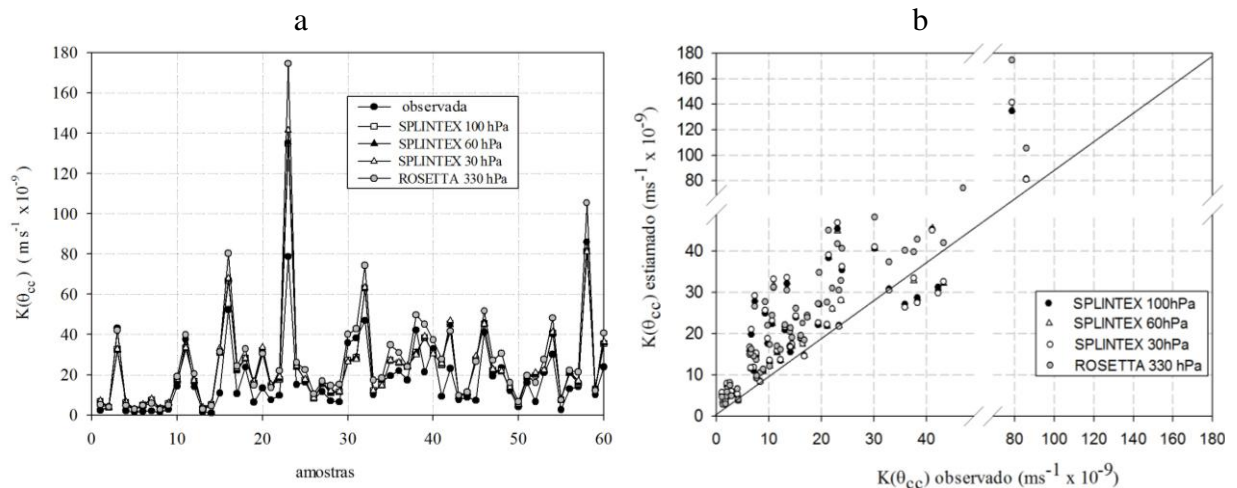


Figura 15. Condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica na capacidade de campo $K(\theta_{cc})$: (a) distribuição dos valores observados e simulados pelo *Splintex* e *Rosetta*; e (b) correlação entre os valores observados e simulados pelo *Splintex* e *Rosetta*.

3.3.5.2. POTENCIAL MÁTRICO OBSERVADO E ESTIMADO COM AS FPT's *Splintex* e *Rosetta* NA CAPACIDADE DE CAMPO $[\psi_m(\theta_{cc})]$

Um fator que merece destaque na determinação da θ_{cc} refere-se aos valores de $|\psi_m|$ utilizados na sua determinação. Tomasella & Hotnett (2004) relatam que a umidade volumétrica à 330 hPa como uma medida de θ_{cc} tem sido considerada muito alta para os solos tropicais (van den Berg et al., 1997). Segundo os autores, o valor de θ na tensão de 100 hPa, ou mesmo em menores tensões (60 hPa) fornece uma estimativa mais plausível da capacidade de campo, como pode ser observado os resultados de $[\psi_m(\theta_{cc})]$ na (Tabela 13). Por essa razão, várias FPT's desenvolvidas para solos tropicais incluem a estimativa da umidade volumétrica 100 hPa e o *Rosetta*, à 330 hPa.

Os valores obtidos de $[\psi_m(\theta_{cc})]$ para os solos arenoso e argiloso apresentaram alta variabilidade (Tabela 13). No solo arenoso os valores variaram de 29,68 a 97,56 hPa para os dados observados e de 28,04 a 94,04 hPa para simulados. Manyame et al. (2007), para um

solo arenoso do Níger, encontraram valores de θ_{cc} em tensões inferiores a 100 hPa, semelhante ao encontrado neste estudo.

Tabela 13. Estatística descritiva do potencial matricial $[\psi_m(\theta_{cc})]$ observado referente à umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) e suas simulações com o *Splintex* e *Rosetta*.

FPT	Estatística Descritiva							
	Min	Max	X	DP	MAE	RMSE	r	CV
	----- hPa -----							
Solo Arenoso								
Dados observados	29,68	97,56	63,30	12,77	-	-	-	20,17
<i>Splintex</i> 30 hPa	28,09	69,55	48,66	9,29	15,62	19,57	0,3275	19,09
<i>Splintex</i> 60 hPa	28,54	78,71	55,71	11,52	13,81	17,13	0,1898	20,68
<i>Splintex</i> 100 hPa	28,04	81,21	56,93	12,72	15,79	19,12	-0,0180	22,35
<i>Rosetta</i> 330 hPa	55,80	94,04	71,29	9,27	16,13	20,46	-0,4726	13,00
Solo Argiloso								
Dados observados	21,48	2530,23	183,17	395,63	-	-	-	215,98
<i>Splintex</i> 30 hPa	24,83	98,32	65,52	19,41	124,32	400,90	0,4249	29,63
<i>Splintex</i> 60 hPa	29,76	206,41	114,48	48,79	112,62	376,85	0,4751	42,62
<i>Splintex</i> 100 hPa	18,33	907,79	178,26	146,72	142,86	366,61	0,3486	82,31
<i>Rosetta</i> 330 hPa	122,59	628,87	200,68	79,00	153,26	327,67	0,8504	39,37

DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação; x: média dos valores estimados; RMSE: *root mean square error*; MAE: *mean absolute error*; r: coeficiente de correlação.

No solo argiloso a variabilidade aumentou consideravelmente (Tabela 13), apresentando valor médio observado de 183,17, e o simulado variando em média de 65,52 a 200,68 hPa. Logo a padronização de tensões para determinação da θ_{cc} não representa as condições reais, diferindo-se para solos arenosos e argilosos.

Percebe-se na (Figura 16a) uma distribuição uniforme entre os dados do *Splintex* em relação aos dados observados. Já na (Figura 16b), que corresponde ao solo argiloso, a simulação do *Splintex* 60 hPa foi a que apresentou melhor desempenho. Em relação a simulação do *Rosetta* superestimou em todos os pontos amostrais, com alguns pontos *outliers*, que correspondem aos pontos 24, 29, e 40.

Como para a determinação de $[\psi_m(\theta_{cc})]$ necessita-se dos parâmetros presentes na eq.(6), advindos da eq.(1), o erro foi acumulativo, principalmente devido ao parâmetro n apresentar uma discrepância em relação aos demais. Mas, verifica-se que os valores simulados representaram o mesmo comportamento do dado observado, exceto para os três pontos citados, com uma superestimativa para a simulação do *Rosetta* aos pontos observados.

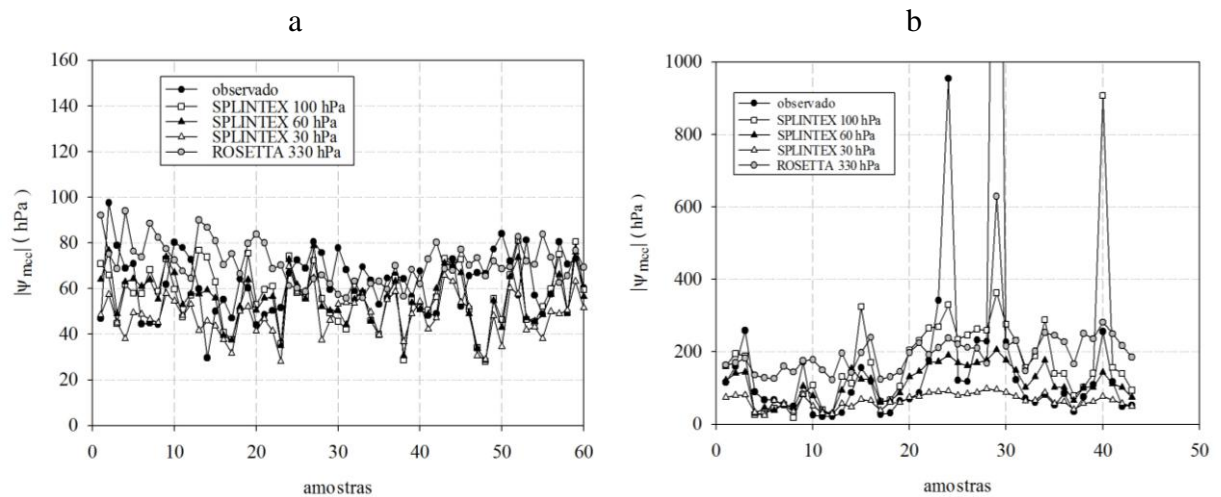


Figura 16. Função do $[\psi_m(\theta_{cc})]$ com os valores observados e simulados com o *Splintex* e *Rosetta*: (a) 60 pontos amostrais para solo arenoso; e (b) 43 pontos amostrais para solo argiloso.

3.3.5.3. Função da capacidade específica da água no solo

Avaliando os resultados da função $C(\theta)$ na (Tabela 14), observa-se que ambas as simulações os resultados foram similares. Em relação com o *Splintex* apresentou os menores erros sistemáticos, com valores médios de RMSE de 0,00006 a 0,0192 hPa^{-1} , similares aos observados.

Tabela 14. Estatística descritiva referente à média da capacidade específica do solo $C(\theta)$.

		$\theta (\text{m}^3 \text{m}^{-3})$						
		0,12	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
$C(\theta) (\text{hPa}^{-1})$	Observados	0,0000	0,0001	0,0005	0,0013	0,0112	0,0180	0,0215
	<i>Splintex</i> 100 hPa	0,0001	0,0003	0,0032	0,0023	0,0039	0,0054	0,0059
	<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,0002	0,0005	0,0036	0,0024	0,0038	0,0049	0,0048
RMSE (hPa^{-1})	<i>Splintex</i> 100 hPa	0,0000	0,0002	0,0029	0,0012	0,0074	0,0136	0,0192
	<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,0002	0,0004	0,0035	0,0013	0,0077	0,0143	0,0203

RMSE: *root mean square error*; θ : umidade volumétrica.

Klein & Libardi (2002) avaliaram a distribuição dos poros sob atividades agrícolas, quantificando as alterações devido ao manejo. Os autores constataram uma modificação na amplitude das curvas, o que significa que o manejo alterou o raio dos poros predominantes até à profundidade de 0,4 m. O uso e manejo do solo modificam consideravelmente o traçado da CRA, com a redução na porosidade e alteração na distribuição do diâmetro dos poros.

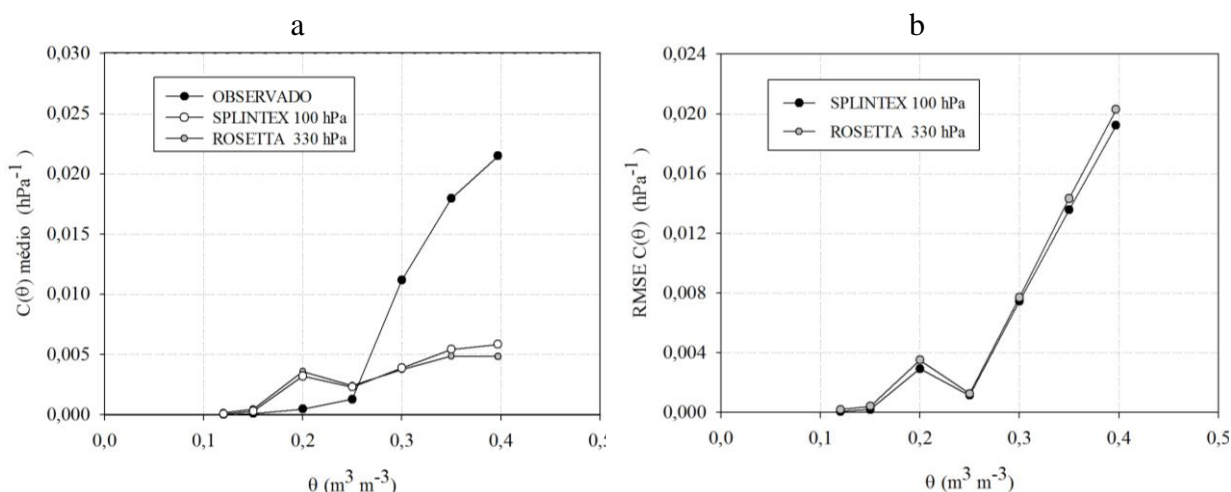


Figura 17. Função $C(\theta)$ e do RMSE nas variações de θ nas simulações com o *Splintex* 100 hPa e *Rosetta* 330 hPa, nos 60 pontos amostrais do solo.

Avaliando-se pontualmente a capacidade específica na umidade na capacidade de campo [$C(\theta_{cc})$], verificou-se nas simulações realizadas com *Splintex* variabilidade similar entre os erros RMSE e MAE, com menores erros obtidos com a simulação *Splintex* 60 e 100 hPa para o solo argiloso e com uma variação de 0,0002 hPa⁻¹ de RMSE entre a melhor e pior simulação para o solo arenoso (Tabela 15).

Tabela 15. Estatística descritiva referente à capacidade específica do solo $C(\theta_{cc})$ observada referente a umidade volumétrica na capacidade de campo e suas simulações com o *Splintex* e *Rosetta*.

FPT	Estatística Descritiva							
	Min	Max	X	DP	MAE	RMSE	r	CV
	----- hPa ⁻¹ -----							%
Solo Arenoso								
Dados observados	0,0009	0,0018	0,0013	0,0002	-	-	-	15,99
<i>Splintex</i> 30 hPa	0,0016	0,0033	0,0021	0,0004	0,0007	0,0008	0,2698	18,89
<i>Splintex</i> 60 hPa	0,0012	0,0034	0,0018	0,0004	0,0005	0,0006	0,5568	24,75
<i>Splintex</i> 100 hPa	0,0011	0,0037	0,0018	0,0005	0,0005	0,0006	0,5101	27,39
<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,0009	0,0025	0,0015	0,0004	0,0003	0,0004	0,4266	24,26
Solo Argiloso								
Dados observados	0,0003	0,0036	0,0007	0,0008	-	-	-	107,89
<i>Splintex</i> 30 hPa	0,0005	0,0042	0,0015	0,0008	0,0008	0,0009	0,7955	53,18
<i>Splintex</i> 60 hPa	0,0003	0,0039	0,0010	0,0007	0,0004	0,0004	0,8850	76,39
<i>Splintex</i> 100 hPa	0,0001	0,0029	0,0008	0,0007	0,0003	0,0005	0,7768	95,18
<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,0001	0,0010	0,0004	0,0002	0,0004	0,0008	0,6947	56,79

DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação; x: média dos valores estimados; RMSE: *root mean square error*; MAE: *mean absolute error*; r: coeficiente de correlação.

Observa-se na (Figura 18) a distribuição dos valores de $C(\theta_{cc})$ para os 60 pontos amostrais do solo arenoso e 43 pontos amostrais do solo argiloso. Nota-se em ambas as simulações superestimativa dos resultados, mas com uma distribuição similar em relação aos observados.

O desempenho de predição do *Splintex* 60 e 100 hPa, para ambos os solos, apresentaram os melhores coeficientes de correlação, com valores de 0,5568 e 0,5101 para solo arenoso e 0,8850 e 0,7763 para solo argiloso. Outro fator é o alto CV para os dados observados, com 107,89 %, demonstrando ser um parâmetro hidráulico com alta variabilidade em campo.

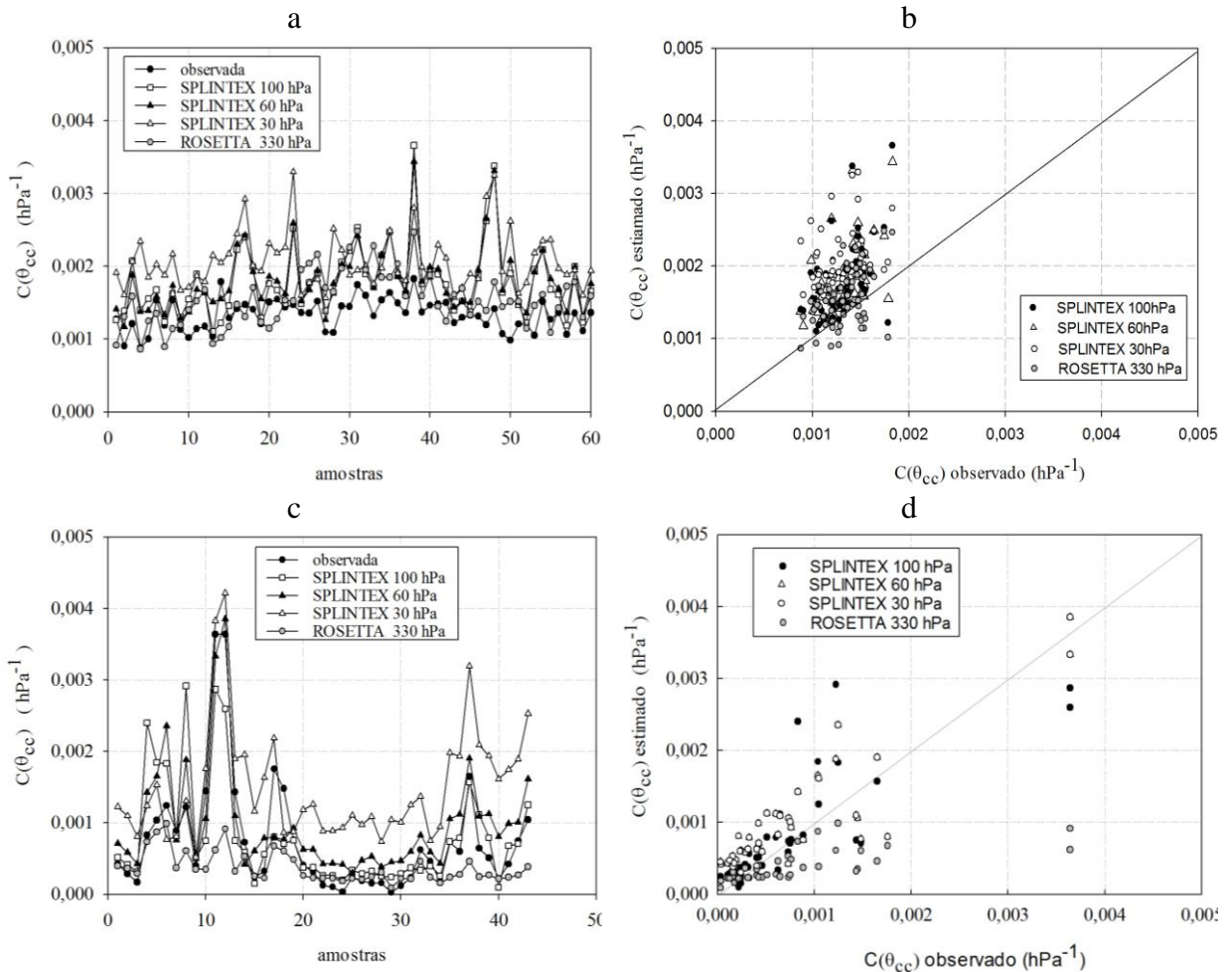


Figura 18. Capacidade específica do solo referente a umidade da capacidade de campo $C(\theta_{cc})$: (a,c) distribuição dos valores observados e simulados com o *Splintex* e *Rosetta* para solo arenoso e argiloso; e (b,d) correlação 1:1 entre os valores observados e simulados com o *Splintex* e *Rosetta* para o solo arenoso e argiloso.

Em geral, a simulação apresentou bons índices de precisão e exatidão e alto coeficiente de correlação, contribuindo para o melhoramento de modelos hidrológicos que necessitam quantificar a distribuição do espaço poroso, com custos relativamente baixos.

3.3.5.4. Função difusividade hidráulica no solo

Verificou-se que os valores estimados da $D(\theta)$ pelo *Splintex* 100 hPa apresentou a melhor exatidão, com crescimento linear do RMSE em função de θ (Tabela 16), exceto para a umidade.

Tabela 16. Estatística descritiva referente à média da difusividade hidráulica do solo $D(\theta)$.

		$\theta \text{ (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{)}$						
		0,12	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
$D(\theta) \text{ (mm}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$	Observados	0,0005	0,0043	0,0302	0,1065	0,0702	0,1850	0,5277
	<i>Splintex</i> 100 hPa	0,0017	0,0100	0,0173	0,1723	0,4452	1,1688	3,1365
	<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,0000	0,0310	0,0425	0,3116	0,7402	1,6915	4,1731
RMSE $\text{(mm}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$	<i>Splintex</i> 100 hPa	0,0020	0,0095	0,0417	0,1348	0,4997	1,2233	11,781
	<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,0010	0,0435	0,0356	0,3532	1,0837	2,4928	11,827

RMSE: root mean square error; θ : umidade volumétrica.

Como $D(\theta)$ é uma relação entre $K(\theta)$ e $C(\theta)$ seu comportamento é potencial, como observado nas (Figuras 19ab). Os valores médios das simulações de $D(\theta)$ superestimaram os valores observados em pequenas proporções, com maior variabilidade a partir da umidade $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, mas apresentando o mesmo seguimento ao observado.

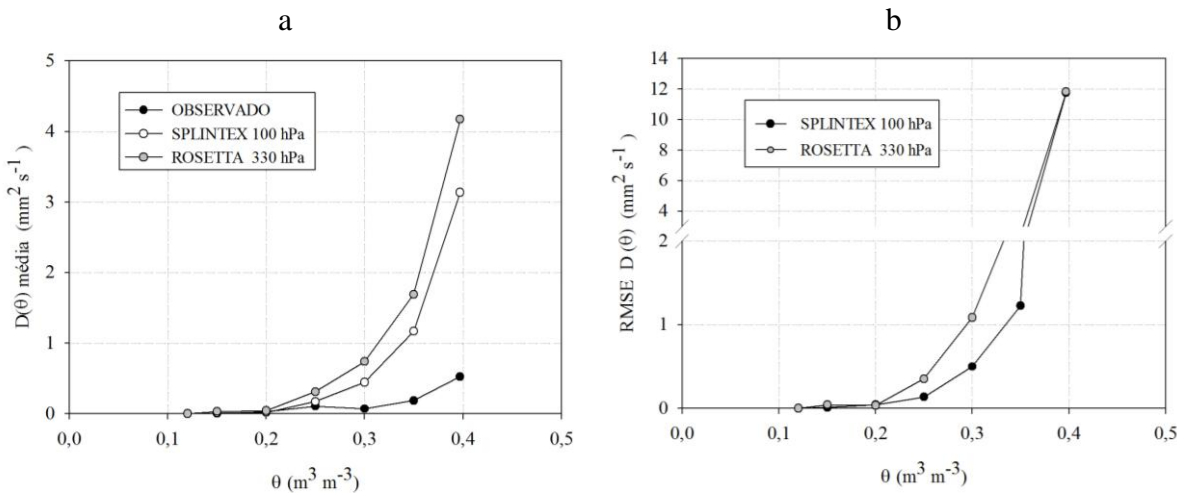


Figura 19. Função da difusividade hidráulica $D(\theta)$ e do RMSE nas variações de θ nas simulações do *Splintex* 100 hPa e *Rosetta* 330 hPa para os 60 pontos amostrais do solo arenoso.

Com base nas parametrizações da relação $K(\theta_{cc})$ é $C(\theta_{cc})$ foi possível quantificar a $D(\theta_{cc})$ do ponto de vista pontual (Tabela 17), e seus respectivos valores de $D(\theta_{cc})$ para cada ponto amostral ilustrado na (Figura 20).

Tabela 17. Estatística descritiva referente à difusividade hidráulica do solo $D(\theta_{cc})$ observada na umidade volumétrica na capacidade de campo e suas simulações com o *Splintex* e *Rosetta*.

FPT	Estatística Descritiva							
	Min	Max	X	DP	MAE	RMSE	r	CV
	-----μm ² s ⁻¹ -----							%
Solo Arenoso								
Dados observados	0,0057	0,6339	0,1336	0,1235	-	-	-	92,64
<i>Splintex</i> 30 hPa	0,0158	0,4291	0,1148	0,0871	0,0436	0,0638	0,8860	75,92
<i>Splintex</i> 60 hPa	0,0191	0,5219	0,1260	0,0940	0,0478	0,0679	0,8381	74,60
<i>Splintex</i> 100 hPa	0,0183	0,5342	0,1276	0,0952	0,0505	0,0717	0,8133	74,57
<i>Rosetta</i> 330 hPa	0,0230	1,1463	0,1762	0,1721	0,0580	0,1052	0,8346	97,62

DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação; x: média dos valores estimados; RMSE: root mean square error; MAE: mean absolute error; r: coeficiente de correlação.

A variabilidade entre os valores de exatidão, simulados pelo *Splintex* 30, 60 e 100 hPa foram similares, com uma variação de $0,0183 \mu\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ de RMSE entre a melhor e a pior simulação. Tanto a difusividade e a condutividade hidráulica são funções da θ , e sua quantificação apresenta alta variabilidade.

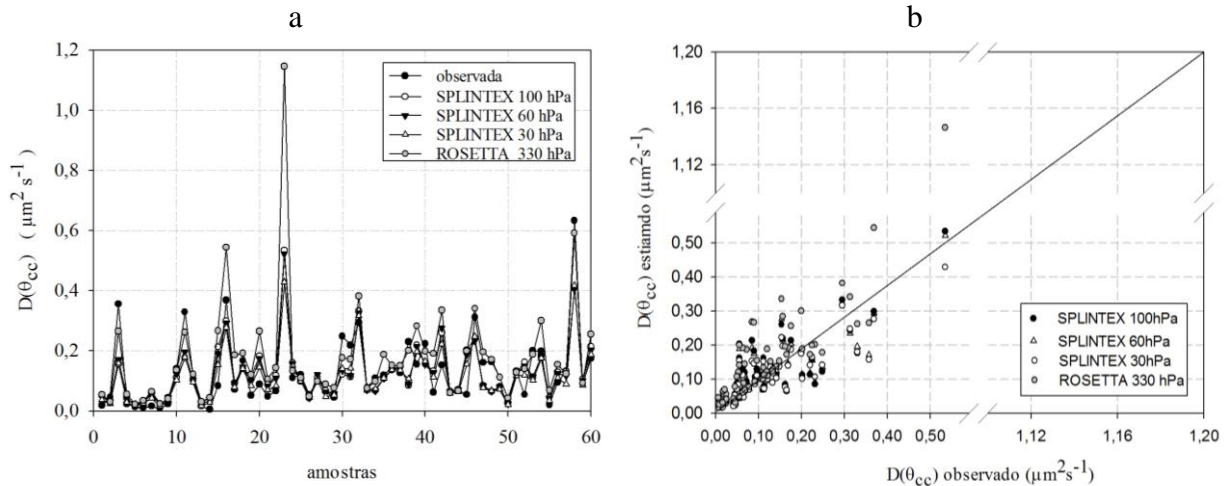


Figura 20. Difusividade hidráulica no solo na umidade de capacidade de campo $D(\theta_{cc})$: (a) distribuição dos valores observados e simulados no *Splintex* e *Rosetta*; e (b) correlação entre os valores observados e simulados com o *Splintex* e *Rosetta*.

Como observado, os valores das simulações com o *Splintex* 30 e 60 hPa apresentaram os melhores desempenhos em comparação com a simulação do *Rosetta*, e menores CV, contribuindo na predição da difusividade e condutividade hidráulica. Essa contribuição pode ser significativa na simulação de modelos hidrológicos que necessitam de propriedades hidráulicas do solo. Como a função $D(\theta)$, que pode ser interpretada como sendo a capacidade de expansão de um fluido em determinado intervalo de tempo, ou seja, a facilidade que o fluido tem em se expandir no espaço e no tempo em um determinado meio poroso (Conceição et al., 2014). A função $D(\theta)$ é um parâmetro hidráulico imprescindível na previsão da absorção de água pelas plantas, estando também relacionada com o movimento (evaporação e infiltração) de água no solo.

As vantagens do programa computacional *Splintex*, em comparação com outras FPT's, permitem melhores predições dos parâmetros hidráulicos do solo. Por se basear em um modelo fisicamente fundamentado, pode-se realizar sua aplicação em solos de qualquer região, respeitando-se os intervalos de confiança. O *Splintex* apresentou-se como uma ferramenta útil e com alta exatidão em relação a demais FPT's na quantificação das funções hidráulicas do solo, contribuindo assim para estudos de grande escala, como por exemplo em bacias hidrográficas.

3.6. CONCLUSÕES

Diante das sessenta amostras de solo arenoso e das quarenta e três amostras de solo argiloso analisadas, e nas condições em que este trabalho foi realizado, conclui-se que:

A simulação com o *Splintex* na tensão de 100 hPa, na estimativa da umidade volumétrica apresentou melhor exatidão em relação a simulação com o modelo *Rosetta*;

A simulação com o *Splintex* na estimativa da umidade volumétrica apresentou menor precisão em relação a simulação com o modelo *Rosetta*;

A simulação dos parâmetros do modelo de Van Genuchten pelas funções de pedotransferência *Splintex* e *Rosetta*, envolvendo como dados de entrada as frações granulométricas (areia, silte e argila), bem como as densidades do solo e das partículas, umidade volumétrica do solo saturado e um par de umidade e tensão da curva de retenção de água no solo, demonstraram baixa capacidade preditiva do parâmetro α . Para os parâmetros θ_r , n e m do mesmo modelo, a capacidade preditiva foi melhor;

A curva característica de água dos solos avaliados, com características de clima tropical, pode ser estimada com precisão e exatidão pelas funções de pedotransferência *Splintex* e *Rosetta* a partir das variáveis areia, silte, argila, densidades do solo e das partículas, umidade volumétrica na saturação e de um par de umidade volumétrica x tensão;

Com os resultados provenientes da simulação no *Splintex*, torna-se possível estimar com confiabilidade as umidades volumétricas na capacidade de campo e no ponto de murchamento permanente, a porosidade de aeração, e a capacidade de água disponível. Ademais, as funções hidráulicas: curva de retenção, condutividade do solo não saturado, capacidade específica e difusividade hidráulica do solo também podem ser estimadas com confiabilidade.

Com os resultados provenientes da simulação no *Rosetta*, torna-se possível estimar com confiabilidade as umidades volumétricas na capacidade de campo e no ponto de murchamento permanente, a porosidade de aeração, a capacidade de água disponível e o potencial mátrico referente à capacidade de campo. Ademais, as funções hidráulicas: curva de retenção e difusividade hidráulica do solo também podem ser estimadas com confiabilidade.

Para o solo arenoso, o modelo *Splintex* apresentou maior exatidão em relação ao *Rosetta* na estimativa das umidades volumétricas na capacidade de campo e no ponto de murchamento permanente, da porosidade de aeração, da condutividade hidráulica do solo não saturado, do potencial mátrico referente à capacidade de campo, da capacidade específica da água no solo e da difusividade hidráulica;

Para o solo argiloso, o modelo *Splintex* apresentou maior exatidão em relação ao *Rosetta* na estimativa da umidade no ponto de murchamento permanente e da capacidade específica da água no solo.

3.7. LITERATURA CITADA

ABBASI, Y.; GHANBARIAN-ALAVIJEH, B.; LIAGHAT, A.M. & SHORAF, M. Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of saline and saline-alkali soils of Iran. *Soil Science Society of China*, 21, 230-237, 2011.

ACOSTA, C.A.; LASCANO, R.J. & STROOSNIJDER, L. Test of the *Rosetta* pedotransfer function for saturated hydraulic conductivity. *Open Journal of Soil Science*, 2:203-212, 2012.

AGUIAR, M.I. Qualidade Física do solo em sistemas agroflorestais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2008. 79p. (Tese de Mestrado).

ANDRADE, R.S. & STONE, L.F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 15:111-116, 2011.

ARYA, L.M. & PARIS, J.F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society American*, 45:1023-1030, 1981.

ARMINDO, R.A. Índices baseados no modelo de van Genuchten como indicadores da qualidade física do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Florianópolis, 2013. Anais. Florianópolis, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2013.

BARCELOS, A.A. Infiltração de água em um Latossolo, sob chuva de alta intensidade, em diferentes sistemas de manejo. Porto alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996. 112p. (Tese de Mestrado).

BARROS, A.H.C.; VAN LIER, Q.J.; MAIA, A.H.N. & SCARPARE, F.V. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern Brazil. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 37:379-391, 2013.

BOTULA, Y.D.; CORNELIS, W.M.; BAERT, G. & van RANST, E. Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (D.R. Congo). *Agricultural Water Management*, 111:1-10, 2012.

BOTULA, Y.D.; RANST, E.V. & CORNELIS, W.M. Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: a review. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 38:679-698, 2014.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advance Soil Science*, 9:177-213, 1989.

BRITO, A. S. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da permeabilidade ao ar em função dos conteúdos de água e ar no solo. Piracicaba, Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2010. 143p. (Tese de Doutorado).

BRITO, A. S.; LIBARDI, P.L.; MOTA, J.C.A.; MORAES, S.O. estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 35:1939-1948, 2011.

BRUAND, A.; DUVAL, O. & COUSIN, I. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO: Une première proposition combinant le type d’horizon, sa texture, et sa densité apparente. *Etude Gestion des Sols*, 11:323-332, 2004.

CONCEIÇÃO, B.; LIMA, L.A.; SANTANA, & ANDRADE, R. Difusividade e condutividade hidráulica não saturada de substratos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18:608-614, 2014.

FIDALSKI, J. & TORMENA, C.A. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente em citros. *Ciência Rural*, Santa Maria, 37:1316-1322, 2007.

GIMESSES, F.H. Curva de retenção na avaliação da qualidade física do solo. Piracicaba, Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2012. 69p. (Tese de Mestrado).

GÜLSER, C & CANDEMIR, F. Prediction of saturated hydraulic conductivity using some moisture constants and soil physical properties. *Balwois*, 27:1-5, 2008.

GHANBARIAN-ALAVIJEH, B.; LIAGHAT, A.; HUANG., G.H. & VAN GENUCHTEN, M.T. Estimation of the van Genuchten soil water retention properties from soil textural data. *Soil Science Society of China*, 20: 456-465, 2010.

HALLAK, R. & FILHO, A.J.P. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo arps: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26:591-608, 2011.

HAGHVERDI, A.; ÖZTÜRK, H.S. & CORNELIS, W. M. Revisiting the pseudo continuous pedotransfer function concept: Impact of data quality and data mining method. *Geoderma*, 227:31-38, 2014.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D. & STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. *Soil Science*, 114:395-400, 1972.

HODNETT, M.G. & TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedotransfer function developed for tropical soils. *Geoderma*, 108:155-180, 2002.

KLEIN, V. A. & LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26:857-867, 2002.

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 44:3-7, 1980.

LUCAS, J.F.R. Obtenção da curva de retenção da água no solo pela câmara de compressão triaxial e pelo papel filtro. Cascavel, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, 2010. 63p. (Tese de Mestrado).

MCBRATNEY, A.B.; MINASNY, B.; CATTLE, S.R. & VERVOORT, R.W. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*, 109:41-73, 2002.

MAJOU, H.A.; BRUAND, A.; DUVAL, O. & COUSIN, I. Variation of the water-retention properties of soils: Validity of class-pedotransfer functions. *Comptes Rendus Geoscience* 339:632-639, 2007.

MANYAME, C.; MORGAN, C.L.; HEILMAN, J.L.; FATONDJI, D.; GERARD, B. & PAYNE, W.A. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. *Geoderma*, 141:407-415, 2007.

MEDEIROS, J.C.; COOPER, M.; ROSA, J.D, GRIMALDI, M. & COQUET, Y. Assessment of pedotransfer functions for estimating soil water retention curves for the amazon region. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 38:730-743, 2014.

MEDRADO, E. & LIMA, J.E.F.W. Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of the Brazilian savanna. *Geoderma Regional*, 1:59-66, 2014.

MICHELON, C.J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRAI, Z.B.; KNIESI, A.E.K.; PETRY, M.T. & MARTINS, J.D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, Santa Maria, 40:848-853, 2010.

MOHAMED, J. & ALI, S. Development and comparative analysis of pedotransfer functions for predicting soil water characteristic content for Tunisian soil. *Tunisia-Japan Symposium on Science, Society & Technology*, 7:170-178, 2006.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12:513-522, 1976.

NUNES, M.C.M. Erosão hídrica em entressulcos de Latossolo do rio Grnade do Sul. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, 2006. 160p. (Tese de Doutorado).

OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; RODRIGUES, J. J. V. & MARQUES, F. A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 26:315-323, 2002.

PACHEPSKY, Y.A., RAWLS, W.J. & GIMENEZ, D. Comparison of soil water retention at field and laboratory scales. *Soil Science Society American Journal*. 65, 460– 462, 2001.

PACHEPSKY, Y.A. & RAWLS, W.J. Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. In: *Developments in Soil Science* 30. Elsevier, Amsterdam, 2004. 525p.

PATIL, N. G.; PAL, D. K.; MANDAL, C. & MANDAL, D. K. Soil water retention characteristics of vertisols and pedotransfer functions based on nearest neighbor and neural networks approaches to estimate AWC. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138:177-184, 2012.

PATIL, N. G.; TIWARY, P.; PAL, D. K.; BHATTACHARYYA, T.; SARKAR, D.; MANDAL, C.; MANDAL, D. K.; CHANDRAN, P.; RAY, S. K.; PRASAD, J.; LOKHANDE, M. & VISHAKHA, D. Soil water retention characteristics of black soils of India and pedotransfer functions using different approaches. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139:313-324, 2013.

PREVEDELLO, C. L. Novo método para estimativa da umidade do solo na condição de capacidade de campo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 4:23-28, 1999.

PREVEDELLO, C.L. & LOYOLA, J.M.T. Modelo para estimar as propriedades hidráulicas de meios porosos a partir da curva granulométrica. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, São Paulo, 2002. Anais. São Paulo, ABMS, 2002. p.467-472.

PREVEDELLO & ARMINDO. Física do solo: com problemas resolvidos. 2.ed. rev. e ampl. Curitiba. C. L. Prevedello, 2015. 474p.

REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; URACH, F.L. & CARLESSO, R. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 33:1547-1560, 2009.

REICHARDT, K. & TIMM, L.C. Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações. São Paulo, Manole, 2004. 478p.

RODAS, A. Determinación de la conductividad hidráulica em muestras de suelo inalterada. Lima, CENDRET, 1970, 118p.

SANTRA, P. & DAS, B.S. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India, *Geoderma*, 146:439-448, 2008.

SILVA, E.M.; LIMA, J.E.F.W.; AZEVEDO, J.A. & RODRIGUES. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41:323-330, 2006.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & IMHOFF, S. Pedotransfer functions for the soil water retention and soil resistance to penetration curves. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 32:11-19, 2008.

SOUZA, G.S. Controle de tráfego agrícola e seus efeitos nos atributos do solo e na cultura da cana-de-açúcar. Campinas, Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Agrícola, 2012. 98p. (Tese de Doutorado).

SCHAAP, M.G. & LEIJ, F.J., van Genuchten, M.Th. Neural networks analysis for hierarchical prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society American Journal*. 62:847-855, 1998.

SCHAAP, M.G. & LEIJ, F.J. 1998. Database related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Science*. 163:765-779, 1998.

SCHAAP, M.G. & LEIJ, F.J. 2000. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten model. *Soil Science Society American Journal*. 64:843-851, 2000.

SCHAAP, M.G.; LEIJ, F.J. & VAN GENUCHTEN, M.Th. *Rosetta*: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal Hydrology*, 251:163-176, 2001.

SCHEINOST, A.C.; SINOWSKI, W. & AUERSWALD, K. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma* 78:129-143, 1997.

TOMASELLA, J. & HODNETT, M.G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Science Society of America Journal*, 163:190-202, 1998.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. & ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Science Society of America Journal*, 64:327-338, 2000.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y.; CRESTANA, S. & RAWLS, W.J. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 67:1085-1092, 2003.

TOMASELLA, J. & HODNETT, M.G. Pedotransfer functions for tropical soils. In: Pachepsky, Y.A. & Rawls, W.J., ed. *Development of pedotransfer functions in soil hydrology*. Amsterdam, Elsevier, 2004. p. 415-429.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G.; CUARTAS, L.A.; NOBRE, A.D.; WATERLOO, M.J. & OLIVEIRA, S.M. The water balance of an Amazonian micro-catchment: the effect of interannual variability of rainfall on hydrological behaviour. *Hydrological Processes*, 22:2133-2147, 2008.

UHDE, L.T. Sistema pedológico em um ambiente antropizado da depressão central do RS. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria Central de Ciências Rurais, 2009. 226p. (Tese de Doutorado).

VAN DEN BERG, M.; KLAMT, E.; VANREEUWIJK, L.P. & SOMBROEK, W.G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. *Geoderma*, 78:161-180, 1997.

VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44:892-897, 1980.

VAN LIER, Q.J. Disponibilidade de água as plantas. In: LIER, Q.J.V., ed. *Física do solo*. 1 ed. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2010. p.283-298.

VAZ, C.M.; IOSSI, M.F.; NAIME, J.M.; MACEDO, A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & COOPER, M. Validation of the Arya and Paris water retention model for brazilian soils. *Soil Science Society of America*, 69:577-583, 2005.

WEYNANTS, M.; VEREECKEN, H. & JAVAUX, M. Revisiting Vereecken pedotransfer functions: introducing a closed-form hydraulic model. *Vadose Zone Journal*, 8:86-95, 2009.

WÖSTEN, J.H.M.; PACHEPSKY, Y.A. & RAWLS, W.J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251:123-150, 2001.

YI, X.; LI, G. & YIN, Y. Comparison of three methods to develop pedotransfer functions for the saturated water content and field water capacity in permafrost region. *Cold Regions Science and Technology* 88:10-16, 2013.

CAPÍTULO 4. DESEMPENHO DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA NA SIMULAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DAS FUNÇÕES HIDRÁULICAS DO SOLO

RESUMO

O conhecimento da dinâmica da água no solo e sua variabilidade espacial representam grande importância para aplicações confiáveis em estudos hidrológicos e ambientais. No entanto, a determinação das propriedades hidráulicas requer tempo e custo elevado. Uma alternativa indireta que vem ganhando espaço na sua obtenção, são as funções de pedotransferências (FPT's), que consistem em determinar propriedades hidráulicas do solo, a partir de atributos físicos facilmente mensuráveis. Assim, teve-se por objetivo avaliar o desempenho de duas FPT's em base paramétrica (*Splintex* e *Rosetta*), quanto à sua capacidade de simular a variabilidade espacial das funções hidráulicas do solo arenoso. O estudo foi realizado na Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba-PR, a partir de dados coletados em uma área experimental da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ-USP), Piracicaba-SP. Nessa área, estabeleceu-se uma parcela de 30 x 50 m, com espaçamento regular de 5 x 5 m, totalizando 60 pontos amostrais georeferenciados, com amostras de solos com a estrutura indeformada e deformada na camada de profundidade de 0,75-0,85 m. Determinaram-se a textura (areia, silte e argila), porosidade total, densidade do solo e das partículas, umidades volumétricas na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, capacidade de água disponível, e as funções hidráulicas do solo (curva de retenção de água do solo, capacidade específica, condutividade e difusividade hidráulica). Os resultados foram analisados, aplicando-se a técnica da estatística descritiva e geoestatística, e os mapas de variabilidade espacial por meio da técnica da Krigagem. Verificou-se que todas as variáveis analisadas apresentaram dependência espacial, o que permitiu o seu mapeamento a partir de técnica geoestatística. Ambas FPT's descreveram bem os semivariogramas, com valores de efeito pepita, patamar e alcances similares entre os dados observados. A qualidade das interpolações por krigagem com base nos resultados simulados não apresentou o mesmo comportamento aos dados observados, entretanto, os resultados da dependência espacial foram similares. Concluiu-se que a utilização das FPT's na determinação da variabilidade espacial apresentou pouca precisão, necessitando de cautela quanto a sua utilização em estudos ambientais e de planejamento agrícola.

Palavras-chaves: Dependência espacial, mapas temáticos, curva de retenção de água no solo.

CHAPTER 4. PERFORMANCE OF PEDOTRANSFER FUNCTIONS THE SIMULATION OF SPATIAL VARIABILITY OF SOIL HYDRAULIC FUNCTIONS

ABSTRACT

Knowledge of the soil hydraulic properties and their spatial variability is crucial for reliable applications in hydrological and environmental studies. To provide this information in a cost-effective way, the indirect estimative of retention and water transport in the soil matrix, from easily measurable soil data, is gaining attention, which are called pedotransfer functions (PTF). This work aimed to evaluate the performance of two PTF's in parametric basis, as their ability to quantify the spatial structure of the hydraulic properties of a sandy soil. The database used is from a study carried out in the experimental area of the College of Agriculture "Luiz de Queiroz" (ESALQ-USP), in Piracicaba, São Paulo, Brazil. It was used a grid of 30 x 50 m, with regular spacing of 5 x 5 m, totaling 60 georeferenced sampling points, with sampling of disturbed and undisturbed soils in the layer depth of 0.75-0.85 m. We determined the texture (sand, silt and clay), total porosity, soil bulk density and soil particle density, soil moisture at field capacity and wilting point, available water capacity and soil hydraulic functions (soil water retention curve, hydraulic conductivity, specific capacity and hydraulic diffusivity). Results were analyzed using descriptive statistics and geostatistics techniques. The attributes and hydraulic functions of soil showed spatial variability, and both PTF's described well the semivariograms with similar nugget effect values, porch and ranges between observed and simulated data from *Splintex* and *Rosetta*. Although the quality of interpolation by krigging based on simulated and observed results had not the same behavior, the analysis of the spatial dependence showed similarities between the results. In conclusion, the use of PTF's to determine hydraulic functions in huge areas can be danger pay attention in its use for environmental and management studies.

Keywords: Spatial dependence, thematic maps, soil water retention curve.

4.3. INTRODUÇÃO

Funções hidráulicas do solo, tais como a curva de retenção de água no solo (CRA) e a condutividade hidráulica do solo (K), são parâmetros indispensáveis para modelar o fluxo de água e transporte de solutos na zona vadosa. No entanto, sua medição direta é onerosa, com custo elevado na aquisição dos aparelhos, necessitando de tempo para sua execução. Nas últimas três décadas, as funções de pedotransferência (FPT's) vêm sendo desenvolvidas como método indireto para estimar os parâmetros hidráulicos do solo, utilizando propriedades do solo facilmente mensuráveis, tais como a distribuição granulométrica, densidade do solo e das partículas, e teor de matéria orgânica (Tomasella et al., 2003; Vereecken et al., 2010; Barros et al., 2013; Haghverdi et al., 2014).

Outro aspecto amplamente discutido sobre as FPT's refere-se a sua capacidade em simular a dependência espacial da variável estimada, como exemplo as propriedades e funções hidráulicas do solo. Sabe-se que as FPT's representam certo desempenho na simulação de propriedades e funções hidráulicas do solo, no entanto, a sua variabilidade espacial vem sendo pouco estudada em meios científicos.

A maioria dos estudos desenvolvidos com FPT's focam os desempenhos (precisão e exatidão), enquanto outros tentam avaliar suas capacidades na simulação da variabilidade espacial das propriedades hidráulicas do solo (Leij et al., 2004; Nebel et al., 2010; Kai-Hua et al., 2011). Além disso, a alta variabilidade espacial natural observada nas propriedades hidráulicas do solo exige quantidade elevada de amostras para sua quantificação, o que dificulta, ou até inviabiliza, trabalhos em locais de difícil acesso e grandes áreas, sendo as FPT's uma alternativa indireta nessas condições.

Romano & Santini (1997) avaliaram o desempenho de quatro FPT's na determinação da retenção de água em solos da Itália e sua capacidade em simular a variabilidade espacial, utilizando ferramentas geoestatísticas. Os autores concluíram que a análise geoestatística mostrou a existência de fortes similaridades nas estruturas da variabilidade espacial detectadas pelas FPT's. Entretanto, os semivariogramas ajustados a partir dos dados estimados com as FPT's, diferiram dos dados observados.

Com o objetivo de melhorar a simulação da variabilidade espacial das propriedades hidráulicas obtidas por FPT's, Leij et al. (2004) avaliaram os efeitos da incorporação dos atributos topográficos na simulação. Os resultados evidenciaram alta correlação entre os

atributos, melhorando a simulação da variabilidade espacial da retenção de água no solo, obtidas por FPT's.

Pringle et al. (2007) propuseram uma correlação de concordância para classificar o desempenho de quatro FPT's, quanto a capacidade de simular a variabilidade espacial da retenção de água em potenciais específicos e a condutividade hidráulica, permitindo, assim, a escolha da melhor FPT que represente a uma escala espacial particular. Os resultados indicaram que os coeficientes de correlação não espaciais não representam um critério de avaliação para prever o sucesso de um FPT em simular a variabilidade espacial das propriedades hidráulicas do solo. A utilização de FPT's desenvolvidas localmente produziram os melhores resultados para representação da variabilidade espacial.

Estudos mais recentes como o de Nebel et al. (2010), avaliou a aplicação de oito FPT's pontuais, desenvolvidas por outros autores, na obtenção da retenção de água e sua variabilidade espacial em dois solos de várzea brasileiros. Os autores concluíram que as FPT's com melhor capacidade preditiva dos valores de umidades nas tensões 33 e 1500 kPa não foram as que tiveram o melhor desempenho para reproduzir a variabilidade espacial das variáveis.

No entanto, Kai-Hua et al. (2011), descrevem que o conhecimento das distribuições espaciais dos parâmetros hidráulicos é essencial, a fim de utilizá-las em modelo hidrológico para fins de gestão de recursos hídricos e estudos ambientais, permitindo um planejamento adequado do experimento, com menor esforço amostral e boa representatividade, resultando assim em exploração mais adequada dos resultados.

Percebendo a forte correlação entre a distribuição granulométrica e os parâmetros hidráulicos do solo, Ramos et al. (2014) desenvolveram diagramas ternários para estimar a retenção de água do solo pontualmente, a partir da distribuição de tamanho das partículas, usando duas abordagens geoestatísticas. A krigagem foi o melhor preditor imparcial linear empírico. Os resultados mostraram que a continuidade espacial da retenção de água do solo ao longo do triângulo textural pode ser descrita por meio de semivariogramas, tendo em conta que a textura do solo foi a principal variável do solo considerada ao agrupar classes de solos com a retenção de água, resultando em um novo tipo de FPT's em base classe.

Neste contexto, teve-se como objetivo avaliar a capacidade de duas FPT's com base paramétrica em simular a variabilidade espacial das propriedades e funções hidráulicas do

solo, por meio de ferramentas geoestatísticas, a partir de um conjunto de dados regionalizados coletados em um solo arenoso no município de Piracicaba – SP.

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O solo utilizado no estudo foi classificado, conforme triângulo textural da Sociedade Brasileira de Ciências do Solo (SBCS), em arenoso, com variação entre as classes em Areia-Franca e Franco-Arenosa. Uma malha de 30 x 50, com 60 pontos amostrais espaçados em 5 m entre si, foram obtidos a partir de um conjunto de dados regionalizados Brito (2010), coletados em uma área de pousio, sem cultivos e com vegetação espontânea há quatro anos, localizado no município de Piracicaba-SP (Figura 1).

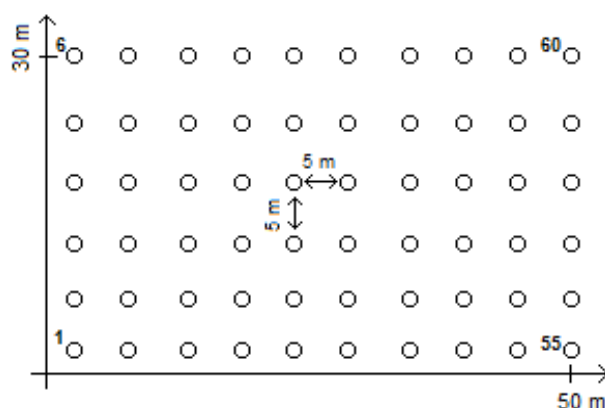


Figura 1. Croqui da área experimental com espaçamento regular dos 60 pontos amostrais de um solo com textura arenosa sob pousio.

A área experimental encontra-se nas coordenadas geográficas 22°42'43" S, 47°37'10" W com 591 m de altitude, apresentando relevo com baixa declividade e pequenas oscilações. Com diferença entre a maior e a menor cota é de 0,765 m.

Para todos os pontos amostrais foram retiradas amostras com e sem estrutura preservada, representativas da camada de profundidade 0,75-0,85 m para determinação das propriedades e funções hidráulicas do solo.

4.4.2. CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Na elaboração da curva de retenção de água no solo (CRA) para os dados observados, utilizaram-se pares de valores de umidade volumétrica e potencial mátrico (θ ;

ψ_m), variando de 10 em 10, de 0 à 100 hPa e nas demais tensões de 300, 500, 700, 1000 hPa. O ajuste da CRA foi realizado com o modelo de van Genuchten (1980), eq.(1), valendo-se da restrição de Mualem (1976), empregando a técnica da minimização da soma dos quadrados dos desvios Santra & Das (2008), obtendo-se, assim, os parâmetros empíricos de ajuste θ_r , λ e n da eq.(1), e fixando-se θ_s ao valor correspondente à porosidade total (α) (Prevedello & Armindo, 2015).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\lambda |\psi_m|)^n\right]^{(n-1)/n}} \quad (1)$$

em que: θ : umidade volumétrica do solo, $m^3 m^{-3}$; θ_s e θ_r : umidade volumétrica na saturação e residual do solo, $m^3 m^{-3}$; ψ_m : potencial matricial da água no solo, hPa; $\lambda(hPa^{-1})$ e n : parâmetros de ajuste do modelo.

4.4.3. SIMULAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE VAN GENUCHTEN POR MEIO DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA

A elaboração da CRA, foi obtida a partir da simulação em programas computacionais nomeados *Splintex* e *Rosetta*, que geraram os parâmetros da eq.(1), resultando em FPT's paramétricas.

4.4.3.1. *Splintex*

Desenvolvido por Prevedello & Loyola (2002), o modelo de FPT foi transcrito em um algoritmo computacional nomeado *Splintex*, que utiliza atributos físicos do solo como dados de entrada, (Figura 2). Tem-se como resposta os parâmetros da eq.(1), que descrevem a CRA e a condutividade hidráulica do solo saturado (K), obtida a partir da correlação com os dados de entrada e os resultados de K do experimento de Rodas (1970). Para melhor predição dos parâmetros da eq.(1), utilizou-se um par de valores de $(\theta; |\psi_m|)$ conhecido experimentalmente, referente a tensão 100 hPa, por apresentar um ponto da CRA de fácil obtenção.

O programa *Splintex* é fundamentado na proposta de Arya & Paris (1981) e na função *spline* cúbica para predizer os parâmetros da equação de van Genuchten (1980), a partir de dados de granulometria, densidades do solo e das partículas e, opcionalmente, umidade na saturação e um ponto de tensão e umidade, obtidas experimentalmente.

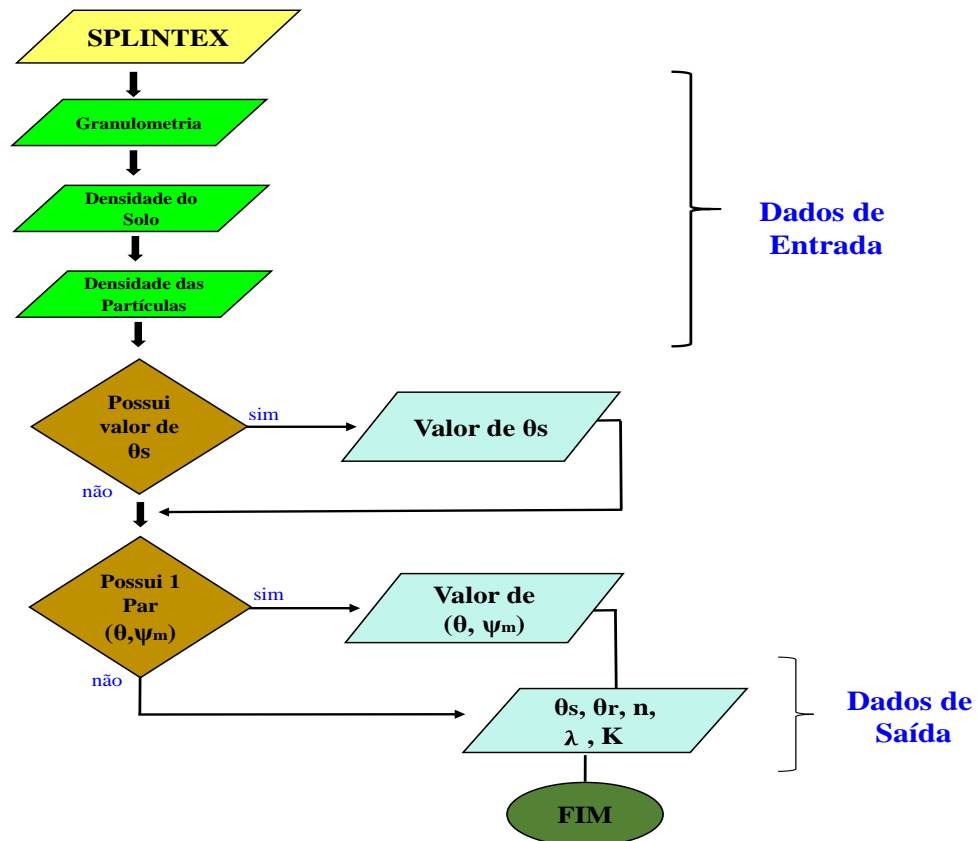


Figura 2. Fluxograma do funcionamento do *Splintex* na obtenção dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980).

4.4.3.2. *Rosetta*

O programa computacional *Rosetta* foi desenvolvido por Schaap et al. (2001), utilizando registros de bancos de dados hidráulicos do solo e suas respectivas propriedades físicas preditivas, que foram obtidos a partir de três bases de dados Schaap & Leij, (1998) e Schaap et al. (2001). A maioria das amostras foram obtidas de solos com clima temperado a climas subtropicais da América do Norte e Europa.

Composto por cinco FPT's hierárquicas, o *Rosetta* é capaz de estimar as funções CRA e condutividade hidráulica do solo saturado não saturado $K(\theta)$, por meio dos parâmetros da eq.(1). Assim como realizado no *Splintex*, as funções foram simuladas para os mesmos 60 pontos amostrais do solo arenoso e 43 do argiloso, valendo-se dos seguintes dados de entrada: porcentagem de areia, silte e argila, densidade do solo e um par de $(\theta, |\psi_m|)$. Sabendo-se que o *Rosetta* permite a inserção, por parte do usuário, do par $(\theta_{330}, 330)$ ou pares $(\theta_{330}, 330)$ e $(\theta_{15000}, 15000)$ de pontos, optou-se pela tensão de 330 hPa, que é mais facilmente obtida experimentalmente em laboratório. Entende-se que não se justifica estimar a CRA a partir da

determinação de θ na tensão de 15000 hPa, que representa o ponto ensaiado mais demorado da CRA, contrariando a finalidade da estimativa das funções hidráulicas do solo por meio de FPT's.

3.4.4. PROPRIEDADES E FUNÇÕES HIDRÁULICAS DO SOLO OBSERVADAS E SIMULADAS POR FPT's

Com os parâmetros θ_r , λ e n , da eq.(1), obtidos no ajuste dos dados observados e nas simulações realizadas no *Splintex* e *Rosetta* realizou-se o equacionamento de outras funções hidráulicas do solo como a condutividade hidráulica, capacidade específica da água e difusividade hidráulica do solo. Além das funções hidráulicas, analisaram-se também algumas propriedades hidráulicas, como as umidades volumétricas na capacidade de campo, no ponto de murchamento permanente capacidade de água disponível.

4.4.4.1. Capacidade de água disponível

Os valores de capacidade de água disponível (CAD) foram determinados, para o solo arenoso, tomando-se a diferença entre umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) conforme eq.(2) e a umidade volumétrica no ponto de murchamento permanente (θ_{pmp}), obtido a partir da eq.(1) na tensão de 15000 hPa para dada camada de solo (z), $CAD = [\theta_{cc} - \theta_{pmp}] \cdot z$, (van Lier, 2010). O valor de z foi estabelecido em 100 mm, já que a camada de solo varia de 0,75 a 0,85 m para o solo arenoso em estudo.

4.4.4.2. Umidade volumétrica na capacidade de campo

A umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) foi considerada quando a taxa de drenagem do solo atingir um valor desprezível. Esse valor é atingido quando a variação da umidade em relação ao tempo tender a zero ($d\theta/dt \rightarrow 0$), ou seja, quando a razão entre a drenagem de água e a condutividade hidráulica na saturação $[K(\theta)/K]$ for negligenciável, eq.(2), (Prevedello, 1999; Andrade & Stone, 2011; Armindo, 2013).

$$\theta_{cc} = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\left(\frac{K(\theta)}{K} \right)^{\left(\frac{1,5n+0,5}{0,5-2,5n} \right)} \right]^{\left(\frac{1-n}{1,5n+0,5} \right)}$$

em que: θ_{cc} : umidade volumétrica na capacidade de campo, $m^3 m^{-3}$; θ_s e θ_r : umidade volumétrica na saturação e residual do solo, $m^3 m^{-3}$; $[K(\theta)/K]$: taxa de drenagem quando

atingir a 1% da condutividade hidráulica na saturação; e n: parâmetro de ajuste da eq.(1), adimensional.

4.4.4.3. Condutividade hidráulica do solo saturado

Os valores observados da condutividade hidráulica do solo saturado (K) foram obtidos por Brito (2010) em campo valendo-se do método do perfil instantâneo, na camada de profundidade de 0,75 a 0,85 m, seguindo a proposta por Hillel et al. (1972) e determinando os valores de K pelo método de Libardi et al. (1980). Detalhes do experimento podem ser obtidos em Brito (2010).

4.4.4.4. Função condutividade hidráulica do solo não saturado

Para o cálculo da condutividade hidráulica do solo não saturado $[K(\theta)]$ em cada ponto amostral foi utilizada a eq.(3), proposta por van Genuchten (1980). As umidades volumétricas foram consideradas entre o maior valor de θ_s e o menor valor de θ_r , dispostos no banco de dados, sendo subdivididas em 0,12; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35 e 0,40 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

$$K(\theta) = K \left\{ \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{0,5} \left[1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{n/(n-1)} \right]^{(n-1)/n} \right]^2 \right\} \quad (3)$$

em que: $K(\theta)$: condutividade hidráulica do solo não saturado, m s^{-1} ; K: condutividade hidráulica do solo saturado, m s^{-1} ; θ_s e θ_r : umidade volumétrica na saturação e residual do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; n: parâmetro de ajuste da eq.(1).

4.4.4.5. Função capacidade específica da água no solo

A função capacidade específica da água no solo $[C(\theta)]$ foi obtida realizando-se a derivada da eq.(1) (Prevedello & Armindo, 2015). A função é representada pela eq.(4) e possui diversas aplicações na Física do Solo, dentre elas a associação com a distribuição de frequência dos poros. Para determinação da função $C(\theta)$ aplicou-se na eq.(4) as tensões referentes aos valores de θ na eq.(3), para cada ponto amostral.

$$C(\psi_m) = \frac{-(n-1)\lambda^n (\theta_s - \theta_r) |\psi_m|^{n-1}}{\left[1 + (\lambda |\psi_m|)^n \right]^{(2n-1)/n}} \quad (4)$$

em que: $C(\theta)$: capacidade específica da água no solo, hPa^{-1} ; θ_s e θ_r : umidade volumétrica na

saturação e residual do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ψ_m : potencial matricial, hPa; $\lambda(\text{hPa}^{-1})$ e n : parâmetros de ajuste da eq.(1).

4.4.4.6. Função difusividade hidráulica no solo

A difusividade hidráulica no solo $[D(\theta)]$ foi obtida pela razão entre a eq.(3) e a eq.(4) (Prevedello & Armindo, 2015). Assim, a $D(\theta)$ foi resultada nas respectivas unidades volumétricas introduzidas nas funções $K(\theta)$ e $C(\theta)$, eq.(5).

$$D(\theta) = \frac{K(\theta)}{C(\theta)} \quad (5)$$

em que: $D(\theta)$: difusividade hidráulica do solo, $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$; $K(\theta)$: condutividade hidráulica do solo não saturado, cm s^{-1} ; $C(\theta)$: capacidade específica da água no solo, hPa^{-1} .

4.4.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA E GEOESTATÍSTICA

Na análise exploratória dos dados, utilizou-se a estatística clássica com o auxílio do *software R (DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014)*; para: *i*) construção de gráficos quantis-quantis (*qqplot*), analisando-se os dados seguem distribuição normal; *ii*) avaliação da dispersão dos dados em relação às coordenadas vertical e horizontal da área experimental; e *iii*) gráficos de caixa (*boxplot*) para verificar a dispersão e a presença de valores discrepantes.

Na análise espacial, utilizou-se o pacote *geoR* Ribeiro Junior & Diggle, (2001), para avaliar a disposição dos dados nos seus locais de medida, por meio da função “points” e o semivariograma, como ferramenta para investigar a dependência espacial, e a técnica Krigagem para a interpolação dos dados em locais não amostrados.

4.4.5.1. Semivariograma

Com o semivariograma avaliou-se a dependência espacial (DE), permitindo o cálculo dos parâmetros envolvidos no modelo (Figura 3).

Com a obtenção do semivariograma, avaliou-se o alcance (a) máximo da DE; efeito pepita (C_0), representando o valor da semivariância a distância zero; contribuição (C_1) intervalo no qual o semivariograma cresce, havendo DE, e o patamar (C) representando a altura na qual o semivariograma se estabiliza (Seidel & Oliveira, 2014).

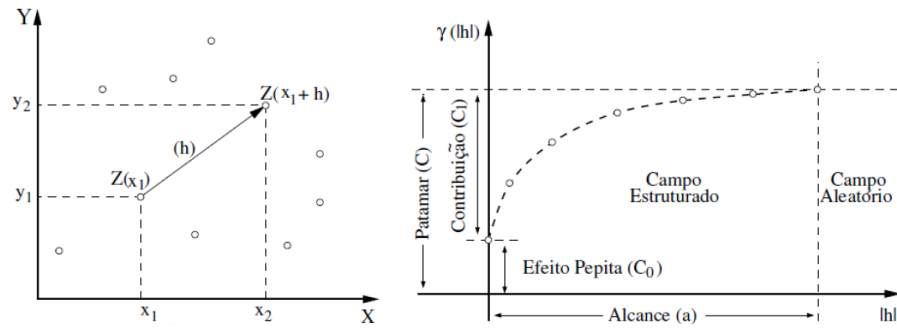


Figura 3. Indicação dos parâmetros do semivariograma. Fonte: Camargo et al. (2004).

Na eq. (6) é apresentado o estimador da função semivariância para variáveis regionalizadas:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (6)$$

em que: $\gamma(h)$: semivariância estimada; $N(h)$: número de pares observados de dados separados por uma distância h ; $Z(x_i)$: valor determinado em cada ponto de leitura; $Z(x_i+h)$: é o valor medido em um ponto, mais uma distância h .

4.4.5.2. Modelos de Semivariograma

Os modelos de semivariograma utilizados foram: Esférico – *Spheric* eq. (7); Exponencial – *Expl* eq.(8); Gaussiano – *Gauss* eq.(9); Onda – *Wave* eq.(10) e o Matérn – *Mat* eq.(11) com *Kappa* (1,5). Disponíveis na função “*likfit*”. Para a função Matérn foi considerado a relação entre o alcance prático e o parâmetro de escala ϕ que depende do *kappa*, com alcances práticos dados por 3ϕ , $4,75\phi$ e $5,92\phi$ para *kappa* igual a 0,5; 1,5; e 2,5, respectivamente (Diggle & Ribeiro Junior, 2007).

$$\gamma(h) = \left[1 - 1,5 \left(\frac{h}{\phi} \right) + 0,5 \left(\frac{h}{\phi} \right)^3 \right] \quad (7)$$

$$\gamma(h) = \exp \left(-\frac{h}{\phi} \right) \quad (8)$$

$$\gamma(h) = \exp \left[\left(-\frac{h}{\phi} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$\gamma(h) = \left[\frac{\phi}{h} \sin \left(\frac{h}{\phi} \right) \right] \quad (10)$$

$$\gamma(h) = \left[\frac{1}{2^{k-1} \Gamma} \left(\frac{\phi}{h} \right)^k S_k \left(\frac{h}{\phi} \right) \right] \quad (11)$$

em que: $\gamma(h)$: semivariância estimada; ϕ : parâmetro de alcance teórico do modelo; h : distância entre os pontos; S : parâmetro ordem kappa que determina a suavidade do processo; $\Gamma(k)$: função Gama; S_k : função Bessel modificada de terceiro tipo de ordem k .

4.4.5.3. Métodos de Ajuste

Para avaliação dos modelos que melhor representam as variáveis estudadas e suas dependências espaciais, utilizou-se os critérios da Máxima Verossimilhança (MV) Seidel & Oliveira, (2014), a partir dos modelos avaliados, conforme a eq.(12):

$$L(\beta, \theta) = \left\{ -\frac{1}{2} \{ \log |K| + (Z - F\beta)^t [K]^{-1} (Z - F\beta) \} \right\} \quad (12)$$

em que: $L(\beta, \theta)$: função de verossimilhança a ser maximizada; F : matriz com os valores das funções; β : vetor de parâmetros do modelo linear; Z : continuidade espacial aleatória à variável; K : $(\tau^2 I + \sigma^2 \Sigma)$; τ^2 : efeito pepita; σ^2 : contribuição; I : matriz de identidade; Σ : matriz de covariâncias baseada no modelo de dependência espacial.

4.4.5.4. Seleção de Modelos

A avaliação do desempenho dos modelos na estimativa da dependência espacial para as funções hidráulicas do solo observadas e simuladas por *Splintex* e *Rosetta* foi realizada por dois critérios. No primeiro, os máximos valores de verossimilhança foram considerados e, no segundo, a avaliação foi realizada a partir do menor valor de *akaike information criterion* (AIC). Em caso de empate, o maior valor de *bayesian information criterion* (BIC), gerado para cada modelo dentro dos respectivos métodos de ajuste, pela seguintes expressões:

$$AIC = -2\log L + 2P \quad (13)$$

$$BIC = -2\log L + P[\log(n)] \quad (14)$$

em que: L: verossimilhança maximizada do modelo avaliado; P: número de parâmetros desse modelo; n: número de dados.

4.4.5.5. Krigagem

A partir da existência de dependência espacial, aplicou-se a técnica da krigagem ordinária, nas estimativas para pontos não observados, gerando-se mapas de variabilidade espacial das funções hidráulicas. A correlação espacial existente entre as simulações e os valores observados foi determinada identificando áreas homogêneas dentro do grid amostral. Segundo Andrade et al. (2005), essa é uma técnica de interpolação não tendenciosa, que possui variância mínima, sendo cada estimativa obtida pelo cálculo da média ponderada de um conjunto de observações ao redor de uma vizinhança, em que a estimativa $\bar{Z}(X_0)$ associada à posição (X_0) é obtida pela expressão:

$$\bar{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i Z(x_i) \quad (15)$$

em que: $\bar{Z}(X_0)$: valores estimados da variável em estudo; (X_0) : ponto a ser estimado, N = número de vizinhos utilizado na estimativa $\bar{Z}(X_0)$; ω_i : pesos ponderados associados a cada valor medido de $\bar{Z}(X_0)$.

4.4.5.6. Grau de Dependência Espacial

Na análise do grau de dependência espacial das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que valores de $[(C_0/(C_0+C_1))]$ menores que 25% são considerados dependência espacial forte, valores de $[(C_0/(C_0+C_1))]$ entre 25 e 75% indicam dependência espacial moderada e valores de $[(C_0/(C_0+C_1))]$ maiores que 75% determinam dependência espacial fraca.

4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1. ESTATÍSTICA DESCRITIVA

A análise com a estatística descritiva das propriedades e funções hidráulicas para os 60 pontos amostrais são apresentadas na (Tabela 1). Os dados apresentados correspondem ao

menor e maior erro quantificado pela raiz quadrada do erro médio (RMSE) entre as sete umidades volumétricas, buscando-se avaliar a que melhor represente a variabilidade espacial das propriedades e funções hidráulicas observadas e simuladas com o *Splintex* e *Rosetta*.

Tabela 1. Estatística descritiva, referente a condutividade hidráulica do solo não saturado (K), capacidade específica da água (C), difusividade hidráulica do solo (D), umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}), umidade volumétrica no ponto de murchamento permanente (θ_{pmp}) e capacidade de água disponível (CAD), para os 60 pontos amostrais de um solo com característica arenosa sob pousio.

Variável	Med	Max	Min	DP	VAR	CV	1° Q	3° Q	ASS	CUR
OBSERVADO										
K' (mm dia ⁻¹)	1,6E-04	1,3E-03	1,2E-09	2,0E-04	4,0E-08	1,3E+02	1,0E-05	2,3E-04	1,9E+00	3,4E+00
K'' (mm dia ⁻¹)	1,3E+02	5,2E+02	7,6E+00	1,2E+02	1,4E+04	8,9E+01	4,5E+01	1,7E+02	1,7E+00	2,9E+00
C' (hPa ⁻¹)	1,9E-05	6,3E-05	7,6E-08	1,4E-05	1,9E-10	7,4E+01	8,0E-06	2,8E-05	1,0E+00	5,4E-01
C'' (hPa ⁻¹)	2,4E-02	6,3E-02	1,2E-02	7,8E-03	6,2E-05	3,3E+01	1,9E-02	2,7E-02	2,1E+00	7,9E+00
D' (mm ² s ⁻¹)	6,0E-04	3,8E-03	2,0E-06	7,0E-04	1,0E-06	1,2E+02	1,0E-04	9,0E-04	1,9E+00	4,9E+00
D'' (mm ² s ⁻¹)	7,5E-01	3,2E+00	2,2E-02	7,2E-01	5,2E-01	9,6E+01	2,5E-01	9,6E-01	1,6E+00	2,4E+00
θ_{cc} (m ³ m ⁻³)	2,5E-01	2,9E-01	2,3E-01	1,4E-02	2,0E-04	5,7E+00	2,4E-01	2,6E-01	3,8E-01	-8,8E-01
θ_{pmp} (m ³ m ⁻³)	9,4E-02	1,2E-01	5,8E-02	1,3E-02	1,0E-04	1,4E+01	8,5E-02	1,0E-01	-6,2E-01	-8,9E-02
CAD (mm)	1,6E+01	2,2E+01	1,2E+01	2,2E+00	4,9E+00	1,4E+01	1,4E+01	1,7E+01	3,4E-01	-7,3E-01
<i>Splintex</i> 100 hPa										
K' (mm dia ⁻¹)	1,4E-03	8,1E-03	1,0E-04	1,3E-03	4,0E-06	9,3E+01	6,0E-04	1,8E-03	2,5E+00	8,1E+00
K'' (mm dia ⁻¹)	1,9E+02	1,0E+03	2,6E+01	1,6E+02	2,6E+04	8,3E+01	9,1E+01	2,2E+02	2,7E+00	1,0E+01
C' (hPa ⁻¹)	7,3E-05	1,4E-05	4,1E-05	1,8E-05	3,2E-10	2,5E+01	6,1E-05	8,4E-05	9,3E-01	1,1E+00
C'' (hPa ⁻¹)	6,0E-03	1,2E-02	4,0E-04	1,9E-03	4,0E-06	3,2E+01	4,8E-03	6,9E-03	7,4E-01	2,2E+00
D' (mm ² s ⁻¹)	2,1E-03	6,8E-03	2,0E-04	1,5E-03	2,0E-06	7,1E+01	9,0E-04	2,9E-03	1,1E+00	8,4E-01
D'' (mm ² s ⁻¹)	5,0E+00	8,9E+01	5,3E-01	1,1E+01	1,3E+02	2,3E+02	1,9E+00	4,7E+00	6,9E+00	4,8E+01
θ_{cc} (m ³ m ⁻³)	2,3E-01	2,5E-01	2,1E-01	6,9E-03	4,9E-05	3,0E+00	2,2E-01	2,3E-01	6,3E-02	2,3E-01
θ_{pmp} (m ³ m ⁻³)	8,7E-02	9,5E-02	7,8E-02	3,4E-03	1,2E-05	3,9E+00	8,6E-02	9,0E-02	-5,2E-01	5,0E-01
CAD (mm)	1,4E+01	1,6E+01	1,3E+01	5,8E-01	3,3E-01	4,1E+00	1,4E+01	1,4E+01	4,6E-01	5,0E-01
<i>Rosetta</i> 330 hPa										
K' (mm dia ⁻¹)	1,1E-05	6,0E-04	0,0E+00	8,0E-05	4,0E-09	7,3E+02	0,0E+00	0,0E+00	7,4E+00	5,3E+01
K'' (mm dia ⁻¹)	1,9E+02	1,0E+03	2,6E+01	1,6E+02	2,6E+04	8,3E+01	9,1E+01	2,2E+02	2,7E+00	1,0E+01
C' (hPa ⁻¹)	1,9E-04	4,2E-04	4,9E-05	9,2E-05	8,0E-09	4,8E+01	1,3E-05	2,5E-04	6,5E-01	-2,6E-01
C'' (hPa ⁻¹)	4,8E-03	7,4E-03	4,0E-04	1,1E-03	1,0E-06	2,3E+01	4,4E-03	5,6E-03	-6,7E-01	2,8E+00
D' (mm ² s ⁻¹)	2,0E-04	1,4E-03	2,0E-10	1,8E-04	3,4E-08	9,0E+01	9,9E-09	1,1E-07	7,4E+00	5,3E+01
D'' (mm ² s ⁻¹)	6,8E+00	7,7E+01	6,2E-01	1,1E+01	1,1E+02	1,6E+02	2,8E+00	7,0E+00	5,2E+00	3,0E+01
θ_{cc} (m ³ m ⁻³)	2,1E-01	2,3E-01	2,0E-01	7,4E-03	5,6E-05	3,5E+00	2,1E-01	2,1E-01	4,2E-01	-3,2E-01
θ_{pmp} (m ³ m ⁻³)	7,1E-02	7,5E-02	6,7E-02	1,4E-03	2,0E-06	2,0E+00	7,0E-02	7,2E-02	-2,9E-01	1,1E+00
CAD (mm)	1,4E+01	1,5E+01	1,2E+01	7,4E-01	5,5E-01	5,3E+00	1,4E+01	1,5E+01	1,6E-01	-3,8E-01

‘: Menores valores de RMSE - raiz do erro médio quadrático; ‘’: Maiores valores de RMSE - raiz do erro médio quadrático; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; 1° Q: primeiro quartil; 3° Q: terceiro quartil.

Quanto à análise da normalidade das variáveis analisadas, constatou-se a necessidade de transformação dos dados para a capacidade específica, condutividade e difusividade hidráulica. Foi utilizado como parâmetro de transformação Box-Cox o valor de λ igual a 0,20; 0,28 e 0,30 na modelagem espacial. Kitanidis (1997) relatou que a suposição de normalidade é inapropriada em alguns casos, mas para atributos contínuos pode ser contornada com transformações, obtendo-se distribuição aproximadamente normal.

Observou-se que os valores de média e mediana de todas as variáveis estão próximos, com assimetria e curtose próximos a zero, evidenciando que esses se aproximam de uma distribuição normal, como apresentado na (Figura 4 e 5), indicando que os dados seguem distribuição simétrica, tanto para os dados observados e simulados. Resultados similares de algumas variáveis foram encontrados por Nebel et al. (2010) e Kai-Hua et al. (2011), avaliando a variabilidade da retenção de água no solo.

Segundo o resumo estatístico apresentado na (Tabela 1), os valores dos coeficientes de variação obtidos nas simulações com o *Splintex* e *Rosetta* foram menores em comparação ao observado. Entretanto, apresentaram médias similares ao observado. Auxiliando como indicativo da qualidade da estimativa das FPT's sem, contudo, revelar sobre a estrutura de variabilidade espacial.

Nos gráficos exploratórios dos dados observados e simulados (Figura 4 e 5), observou-se pequenas zonas com pontos discrepantes para todas as variáveis. Como pode ser observado em cada gráfico (superior direito e no inferior esquerdo) a dispersão das variáveis observada e simulada. Plotadas em razão das coordenadas espaciais, com uma linha suave para facilitar a visualização de tendências em função das coordenadas.

Quanto ao histograma de probabilidade localizado em cada gráfico (inferior direito), observa-se que os dados seguem tendência de distribuição normal para cada variável analisada, com exceção da simulação da condutividade e difusividade hidráulica do solo com o *Rosetta*. Apresentando distribuição assimétrica à esquerda, proveniente dos resultados da média aritmética ser menor que a mediana.

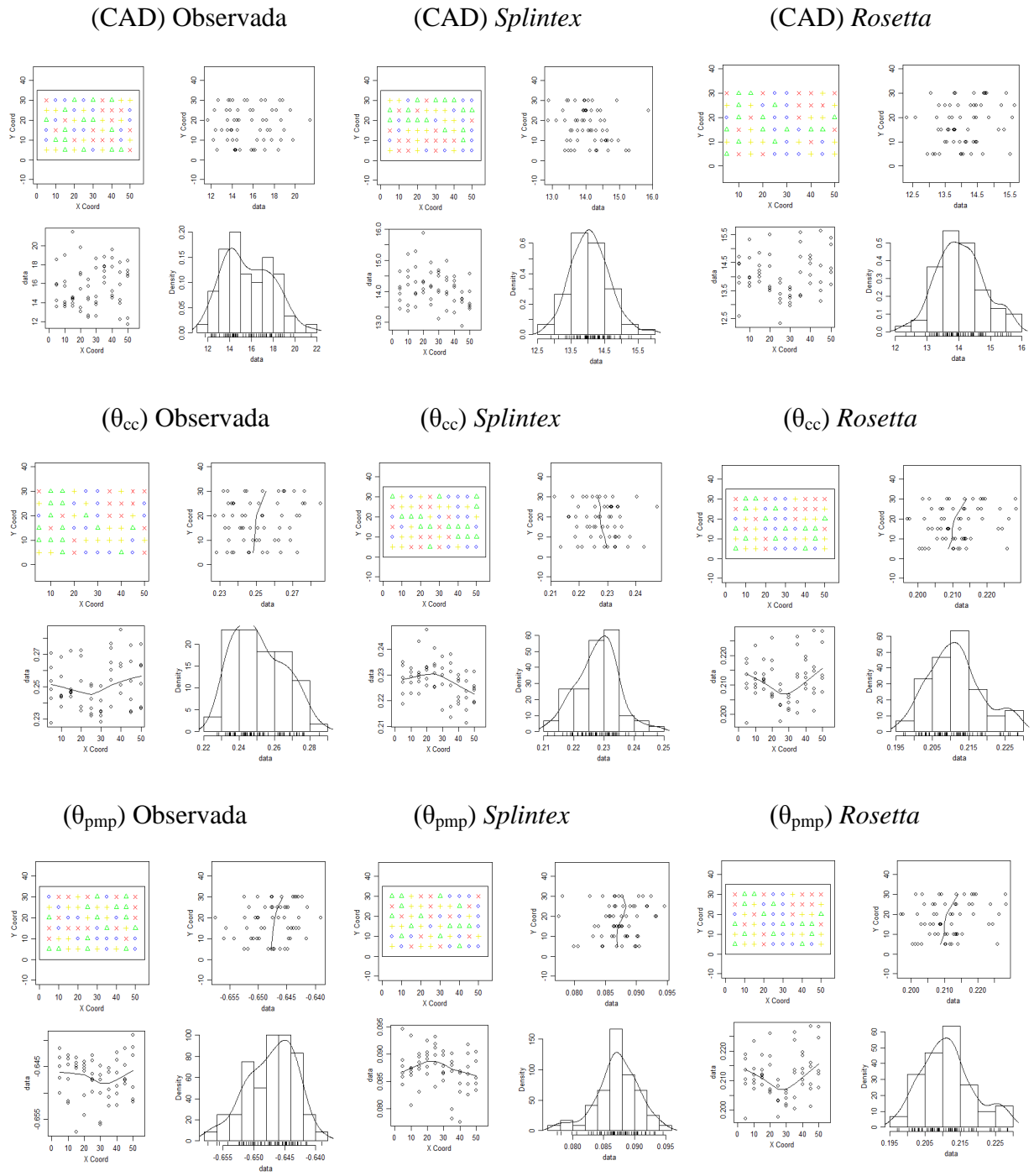


Figura 4. Gráficos de dispersão e histogramas para capacidade de água disponível (CAD); umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}); umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), para os 60 pontos observados e simulados com o *Splintex* e *Rosetta*.

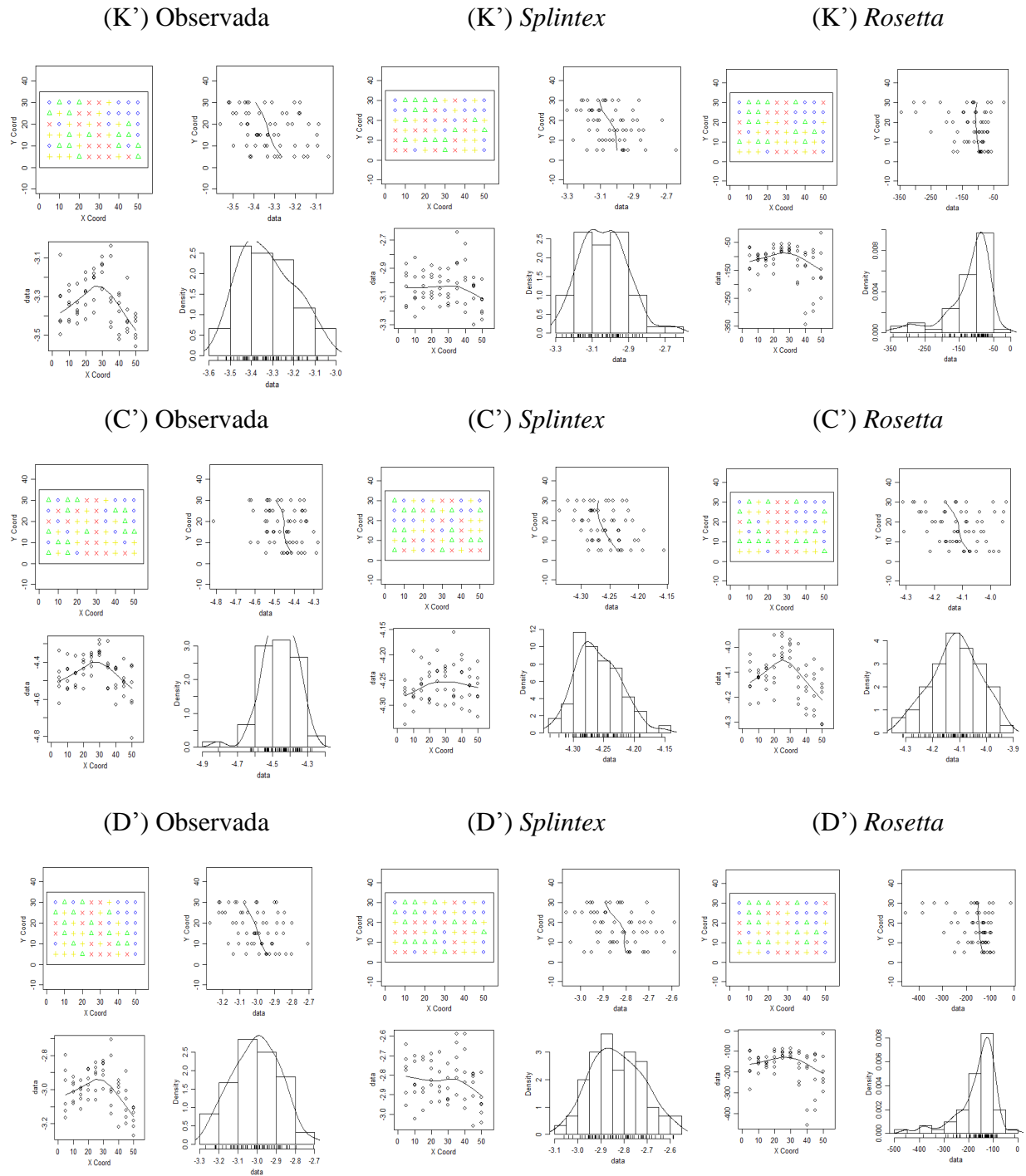


Figura 5. Gráficos de dispersão e histogramas para condutividade hidráulica do solo não saturado (K'); capacidade específica (C'); difusividade hidráulica (D'), com menor raiz quadrada do erro médio (RMSE), para os 60 pontos observados e simulados com o *Splintex* e *Rosetta*.

4.5.2. VARIABILIDADE ESPACIAL

Constatou-se, para todas as variáveis estudadas apresentaram dependência espacial, sendo expresso por meio dos ajustes aos modelos de semivariogramas pelo critério da verossimilhança. Analisando os resultados nota-se que todas as variáveis apresentaram alcance superior a amostragem, com valor mínimo de 7 m e máximo de 22 m, indicando maior continuidade na distribuição espacial das variáveis analisadas (Tabela 2).

Dentre os cinco modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas na quantificação da dependência espacial, o modelo Wave foi o qual se ajustou na maioria das variáveis, com maior evidência nos dados observados.

Avaliando o efeito pepita, verificou-se tanto para os dados observados e simulados com o *Splintex* e *Rosetta*, valores iguais a zero para as umidades volumétricas na capacidade de campo e no ponto de murchamento permanente. De acordo com Trangmar et al. (1985), um efeito pepita igual a zero indica que o erro analítico (experimental) é praticamente nulo e que não existe variação significativa à distâncias menores que a amostragem utilizada. Indicaria uma variabilidade não explicada (ao acaso) de um ponto para o outro, que pode estar atrelada a microvariações.

O grau de dependência espacial foi considerado moderado a forte (Tabela 2), conforme a classificação de Cambardella et al. (1994), sendo esses resultados semelhantes aos encontrados por Romano & Santini, (1997) e Nebel et., (2010). Quanto menor a proporção do efeito pepita para o patamar, maior será a semelhança entre os valores vizinhos e a continuidade do fenômeno. Menor será a variância da estimativa e, portanto, maior a confiança que se pode ter nas estimativas (Vieira, 1997).

Os resultados são importantes para o planejamento experimental da área estudada. Souza et al. (2001) acrescentam que os resultados devem ser levados em consideração nas propostas de manejo e pesquisa, assim como na determinação do número de pontos que devem ser amostrados para atingir melhor representatividade, auxiliando na realização de futuras amostragens.

Tabela 2. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para a condutividade hidráulica do solo não saturado (K), capacidade específica da água (C), difusividade hidráulica do solo (D), umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}), umidade volumétrica no ponto de murchamento permanente (θ_{cc}) e capacidade de água disponível (CAD), para os 60 pontos amostrais de um solo com característica arenosa sob pousio.

Parâmetro Estatístico	K'	K''	C'	C''	D'	D''	θ_{cc}	θ_{pmp}	CAD
Observado									
Modelo	Wave	Wave	Wave	Wave	Wave	Wave	Gauss	Wave	Spheric
C ₀	0,0078	8,6280	0,0055	0,0272	0,0069	0,5317	0,0000	0,0000	1,9510
C ₁	0,0077	1,7720	0,0037	0,0550	0,0081	0,0443	0,0002	0,0000	2,8990
C	0,0155	10,400	0,0092	0,0822	0,0150	0,5760	0,0002	0,0000	4,8500
GDE	0,5032	0,8296	0,5978	0,3309	0,4600	0,9231	0,0000	0,0000	0,4023
a (m)	15,671	9,5889	17,900	6,0873	16,004	9,8393	7,8526	16,126	6,8460
VER	491,00	- 349,1	602,20	220,90	391,30	- 45,46	173,90	176,00	- 132,3
AIC	- 974,1	706,20	- 1196	- 433,7	- 774,7	98,910	- 339,8	- 344,0	272,60
BIC	- 965,7	714,50	- 1188	- 425,4	- 766,3	107,30	- 331,5	- 335,6	281,00
Splintex 100 hPa									
Modelo	Wave	Wave	Wave	Mat	Spheric	Wave	Wave	Wave	Spheric
C ₀	0,0125	6,5530	0,0011	0,0000	0,0086	0,2152	0,0000	0,0000	0,2173
C ₁	0,0042	2,2120	0,0002	0,0000	0,0039	0,0373	0,0000	0,0000	0,1104
C	0,0167	8,7650	0,0013	0,0000	0,0125	0,2525	0,0000	0,0000	0,3277
GDE	0,7485	0,7476	0,8462	0,0000	0,6880	0,8523	0,0000	0,0000	0,6631
a (m)	8,2033	8,5635	19,376	18,236	15,011	7,8875	24,020	5,9862	12,554
VER	336,40	- 365,0	574,80	292,50	316,30	- 137,2	215,20	255,80	- 50,45
AIC	- 664,8	738,00	- 1142	- 577,0	- 624,6	282,40	- 422,3	- 503,5	108,90
BIC	- 656,4	746,30	- 1133	- 568,6	- 616,2	290,70	- 413,9	- 495,2	117,30
Rosetta 330 hPa									
Modelo	Spheric	Wave	Gauss	Gauss	Spheric	Wave	Wave	Wave	Wave
C ₀	0,0000	8,355	0,0028	0,0000	0,0000	0,1686	0,0000	0,0000	0,3450
C ₁	4751,1	3,106	0,0053	0,0000	7235,6	0,0437	0,0000	0,0000	0,1921
C	4751,1	11,461	0,0081	0,0000	7235,6	0,2123	0,0000	0,0000	0,5371
GDE	0,0000	0,7289	0,3457	0,0000	0,0000	0,0113	0,0000	0,0000	0,6423
a (m)	15,092	8,658	16,956	21,049	15,094	8,2414	14,863	6,9488	15,0189
VER	866,00	-380,6	489,70	340,20	901,00	- 162,6	212,10	306,80	- 64,04
AIC	- 1724	769,10	- 971,5	- 672,3	- 1794	333,30	- 416,2	- 605,7	136,10
BIC	- 1716	777,50	- 963,1	- 664,0	- 1786	341,70	- 407,8	- 597,3	144,40

‘: Menores valores de RMSE - raiz do erro médio quadrático; ‘’: Maiores valores de RMSE - raiz do erro médio quadrático; C₀: efeito pepita; C₁: variância; C: patamar; GDE: grau de dependência espacial; a: amplitude; VER: verossimilhança; AIC: *akaike information criterion*; BIC: *bayesian information criterion*.

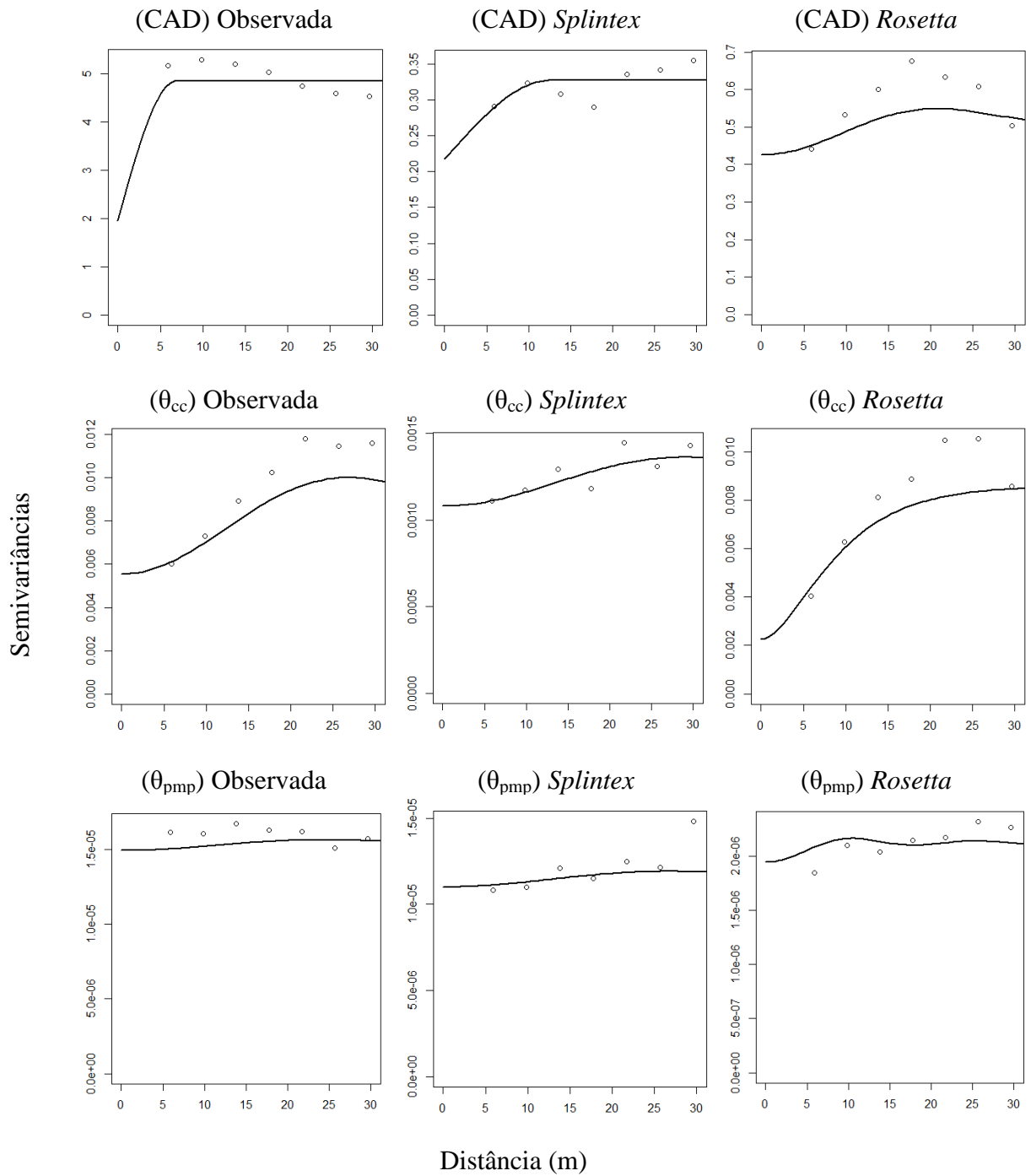


Figura 6. Semivariogramas ajustados para capacidade de água disponível (CAD); umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}); umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), para os 60 pontos observados e simulados com o *Splintex* e *Rosetta*.

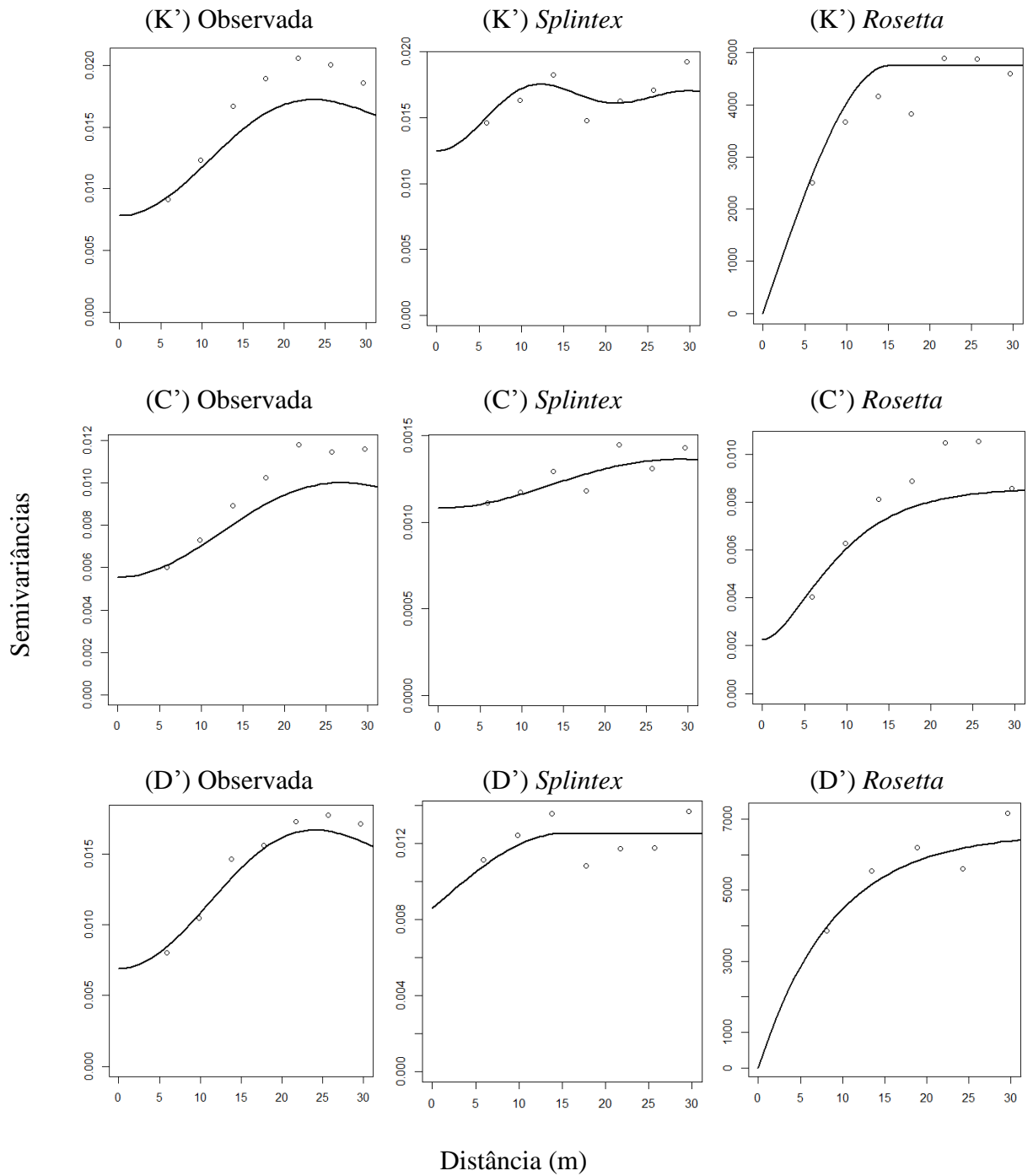


Figura 7. Semivariogramas ajustados para as funções hidráulicas do solo com os menores erros, quantificados pela raiz quadrática do erro médio (RMSE), condutividade hidráulica do solo não saturado (K'); capacidade específica (C'); difusividade hidráulica (D').

Tabela 3. Valores da correlação de Pearson para os mapas das propriedades e funções hidráulicas do solo.

Variável	K'	K''	K' _{sp}	K' _{ro}	K'' _{sp}	K'' _{ro}	C'	C''	C' _{sp}	C' _{ro}	C'' _{sp}	C'' _{ro}	D'	D''	D' _{sp}	D' _{ro}	D'' _{sp}	D'' _{ro}	θ_{cc}	(θ_{cc}) _{sp}	(θ_{cc}) _{ro}	θ_{pmp}	(θ_{pmp}) _{sp}	(θ_{pmp}) _{ro}	CAD	CAD _{sp}	CAD _{ro}
K'	1	-	0,359	-0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K''	-	1	-	-	0,974	0,865	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K' _{sp}	0,359	-	1	-0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K' _{ro}	-0,019	-	-0,068	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K'' _{sp}	-	0,974	-	-	1	0,974	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K'' _{ro}	-	0,865	-	-	0,974	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C'	-	-	-	-	-	-	1	-	0,608	0,829	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C''	-	-	-	-	-	-	-	1	0,481	-	-0,036	-0,144	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C' _{sp}	-	-	-	-	-	-	0,608	-	1	0,481	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C' _{ro}	-	-	-	-	-	-	0,829	-	0,481	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C'' _{sp}	-	-	-	-	-	-	-	-0,04	-	-	1	0,735	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C'' _{ro}	-	-	-	-	-	-	-	-0,14	-	-	0,735	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D'	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	0,325	-0,043	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D''	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	0,343	0,525	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D' _{sp}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,325	-	1	-0,113	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D' _{ro}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,043	-	-0,113	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D'' _{sp}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,343	-	-	1	0,874	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D'' _{ro}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,525	-	-	0,874	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
θ_{cc}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,246	0,506	-	-	-	-	-	-
(θ_{cc}) _{sp}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,246	1	0,389	-	-	-	-	-	-
(θ_{cc}) _{ro}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,506	0,389	1	-	-	-	-	-	-
θ_{pmp}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,154	0,219	-	-	-
(θ_{pmp}) _{sp}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,154	1	0,482	-	-	-
(θ_{pmp}) _{ro}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,219	0,482	1	-	-	-
CAD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,173	0,363
CAD _{sp}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,173	1	0,290
CAD _{ro}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,363	0,29	1

‘: Menores valores de RMSE - raiz do erro médio quadrático; ‘’: Maiores valores de RMSE - raiz do erro médio quadrático; sp: *Splintex*; ro: *Rosetta*; K: condutividade hidráulica do solo não saturado; C: capacidade específica; D: difusividade hidráulica; θ_{cc} e θ_{pmp} : umidade volumétrica na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente; CAD: capacidade de água disponível.

Com a análise geoestatística foi possível observar que há semelhanças nos padrões da variabilidade espacial, como detectada por cada uma das FPT's. Mas os semivariogramas ajustados com o critério da verossimilhança diferiram para as funções e propriedades hidráulicas C'' e θ_{cc} , entre os dados simulados e observados. Entretanto, os valores obtidos da simulação com o *Splintex* e *Rosetta* para efeito pepita, variância, patamar e alcance foram semelhantes aos dados observados, subestimando em algumas variáveis, conforme descrito na (Tabela 2).

Entre as variáveis que apresentaram dependência espacial, determinou-se a correlação de Pearson dos mapas gerados (Tabela 3). Notou-se que a K'' e C' apresentaram maiores correlações positivas entre os resultados observados e as simulações com o *Splintex* e *Rosetta*, demonstrando uma alternativa para avaliação espacial das funções hidráulicas K'' e C' . Como por exemplo, tem-se o *software* desenvolvido por Acutis & Donatelli (2003), que tem por base FPT's para a determinação de parâmetros e funções hidráulicas do solo e mapas de variabilidade espacial.

No entanto, os resultados demonstram que a utilização das FPT's na simulação da variabilidade espacial das propriedades e funções hidráulicas apresentam certa precisão, necessitando de cautela quanto a sua utilização em estudos ambientais, confirmando os estudos de Romano & Santini (1997); Leij et al. (2004); Nebel et. (2010); Kai-Hua et al. (2011), que determinaram a variabilidade espacial da curva de retenção de água no solo e a condutividade hidráulica do solo não saturado por FPT's.

4.5.3. KRIGAGEM

Em todos os mapas de predição obtidos por krigagem para propriedades e funções hidráulicas (Figura 8 a 13), independentemente do modelo, observou-se zonas diferenciadas para cada variável analisada, entre os dados observados e simulados, com maiores diferenças para a θ_{cc} e D' , e as demais com comportamentos similares.

O baixo desempenho das FPT's na determinação da variabilidade espacial das propriedades e funções hidráulicas pode estar atrelado às medições de textura do solo, densidade do solo e das partículas e o par de $(\theta; |\psi_m|)$ ser geralmente insuficientes para explicar todas as variações espaciais, especialmente a condutividade e difusividade hidráulica. Resultados similares foram encontrados por Nebel et al. (2010) e Kai-Hua et al. (2011), avaliaram a capacidade das FPT's ao simular a variabilidade espacial da retenção de água do

solo em tensões específicas, em solos do Brasil e China. Acrescentam que o bom desempenho das FPT's na simulação da variabilidade espacial está atrelado à utilização de dados que considerem a estrutura do solo.

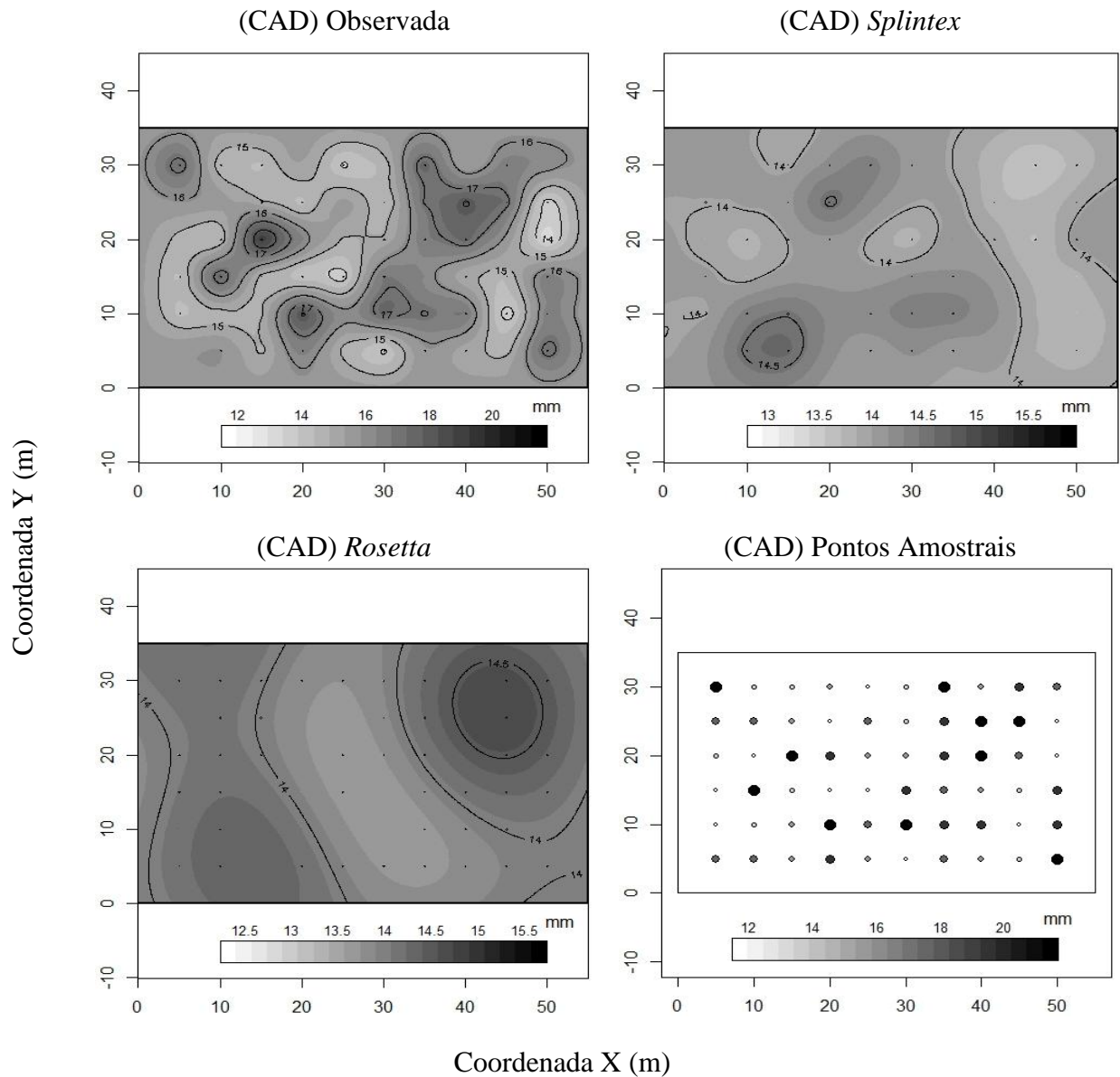


Figura 8. Mapa da variabilidade espacial da capacidade água disponível (CAD) observada e simulada por *Splintex* e *Rosetta* e a distribuição dos valores de CAD observado para 60 pontos amostrais.

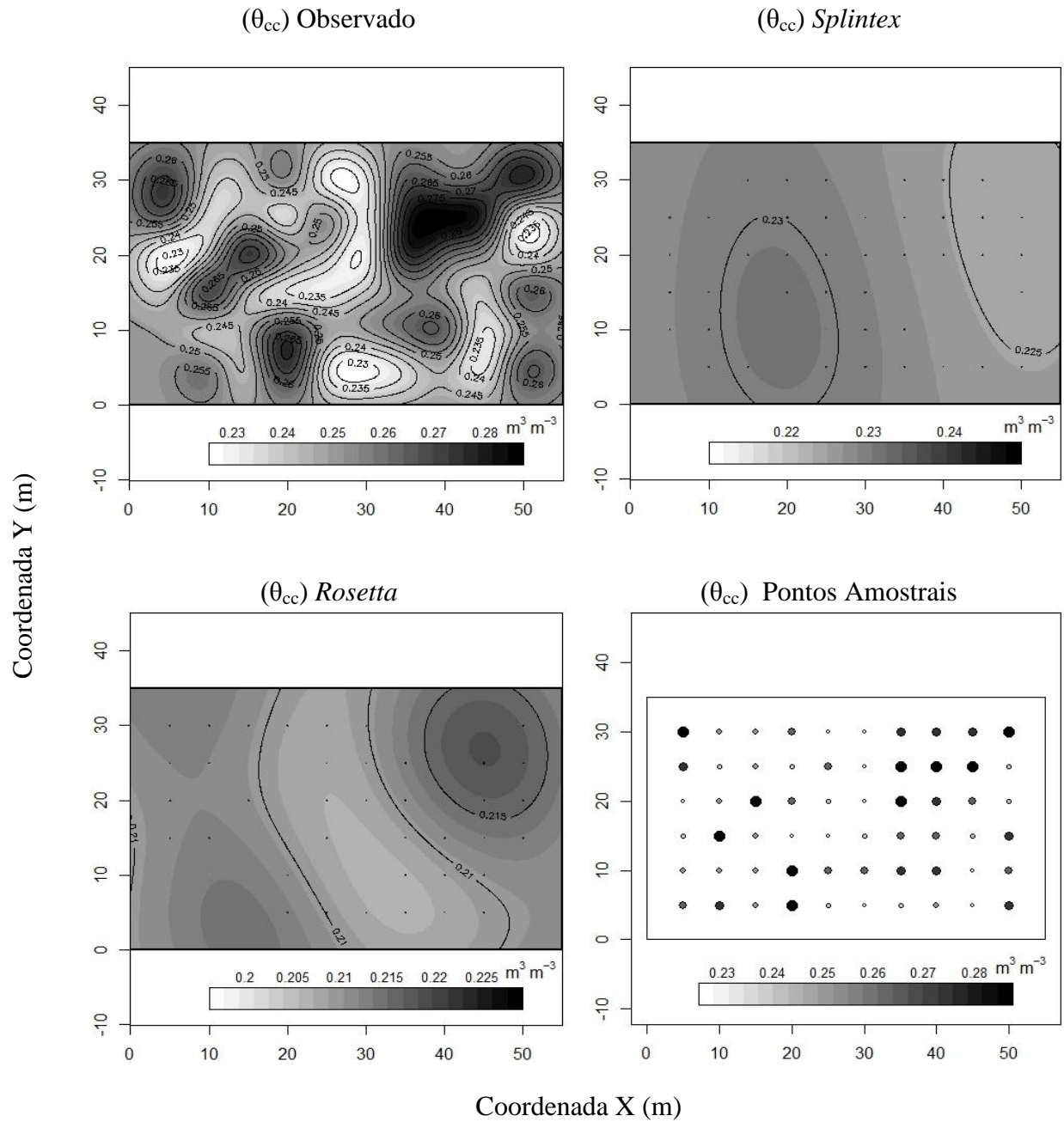


Figura 9. Mapa da variabilidade espacial da umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) observada e simulada por *Splintex* e *Rosetta* e a distribuição dos valores de θ_{cc} observado para 60 pontos amostrais.

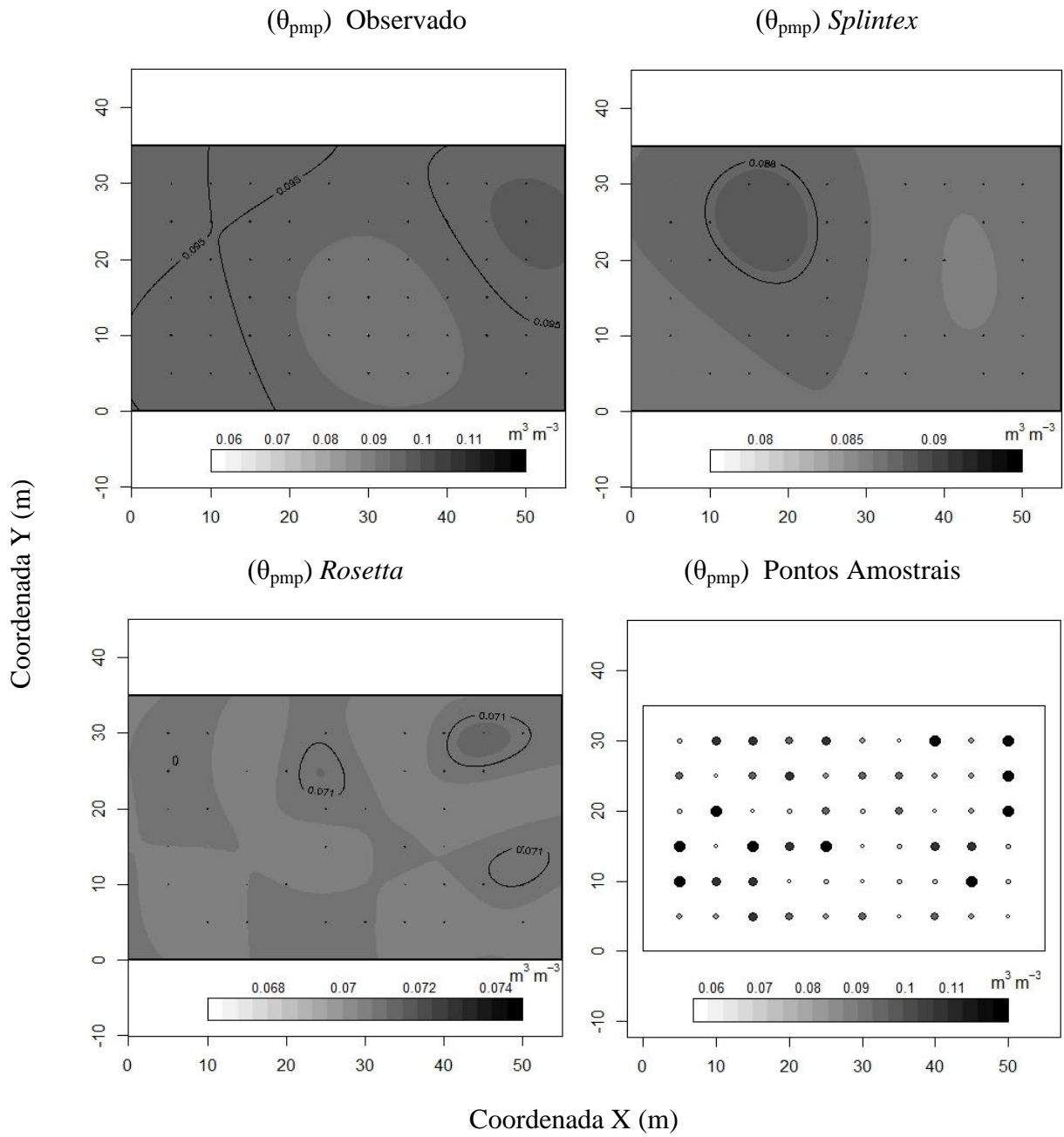


Figura 10. Mapa da variabilidade espacial da unidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) observada e simulada por *Splintex* e *Rosetta* e a distribuição dos valores de θ_{pmp} observado para 60 pontos amostrais.

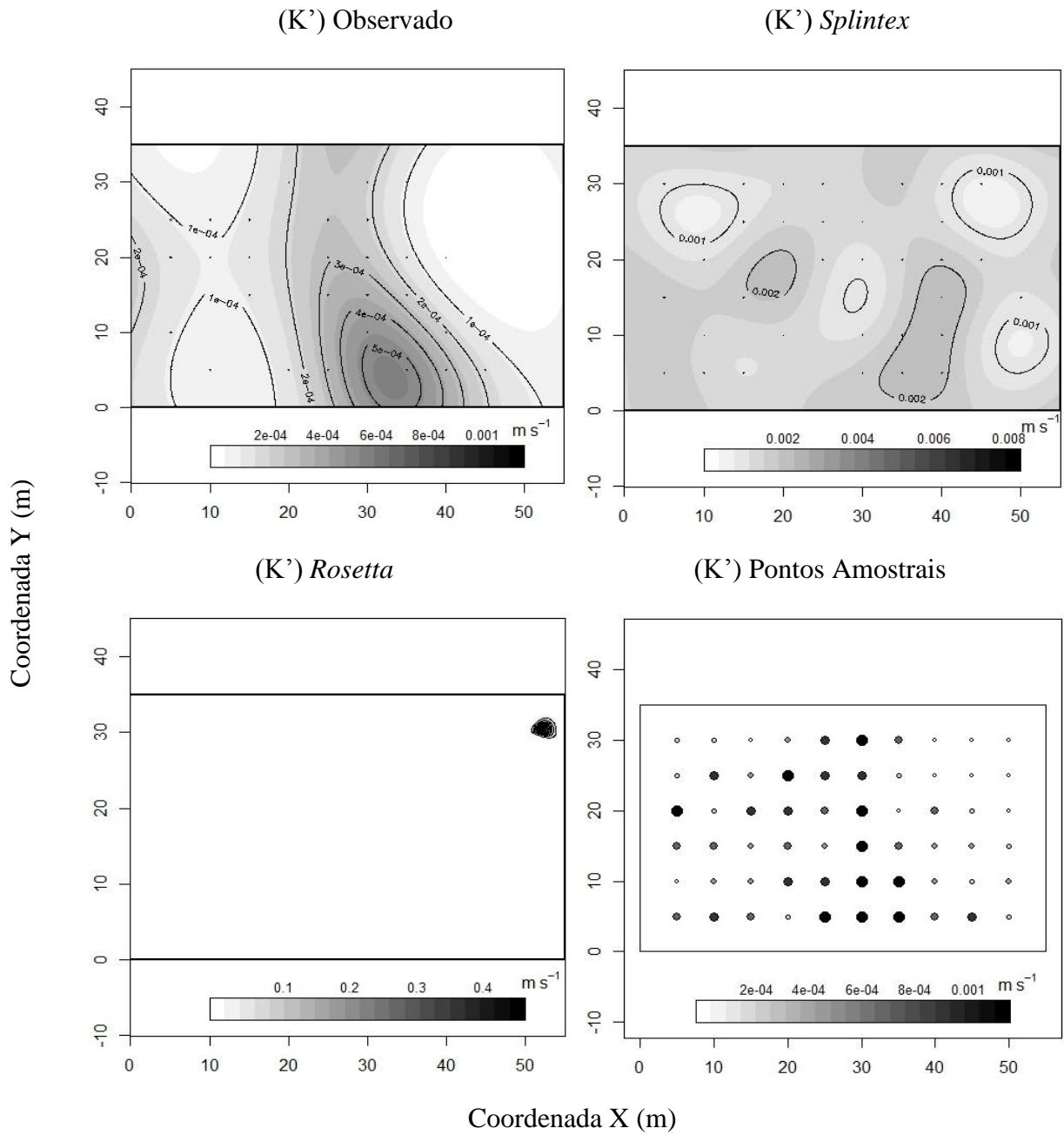


Figura 11. Mapa da variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo não saturado (K') observada e simulada por *Splintex* e *Rosetta*, com menor raiz quadrada do erro médio (RMSE) e a distribuição dos valores de K' observado para 60 pontos amostrais.

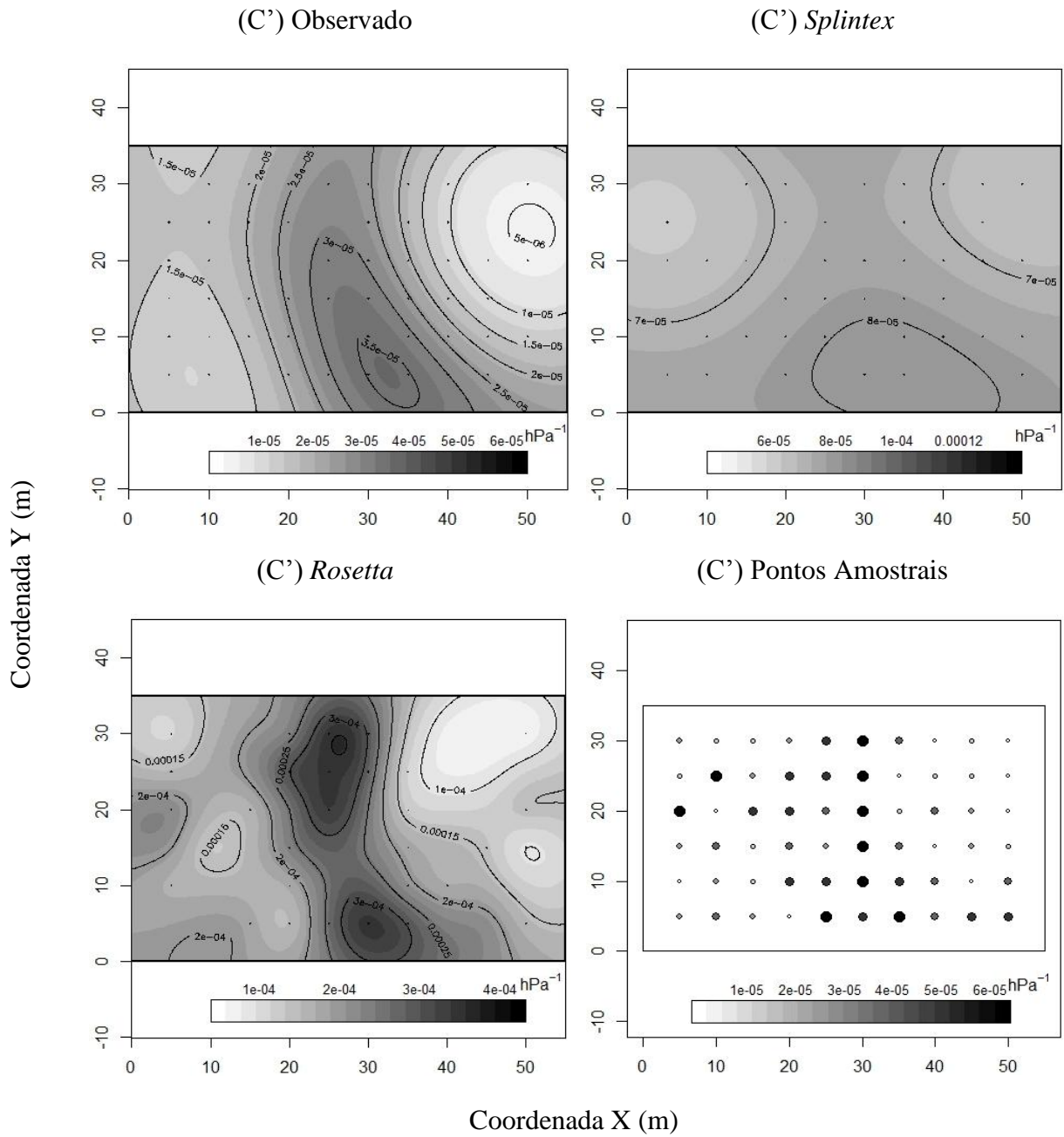


Figura 12. Mapa da variabilidade espacial da capacidade específica (C') observada e simulada por *Splintex* e *Rosetta*, com menor raiz quadrada do erro médio (RMSE) e a distribuição dos valores de C' observado para 60 pontos amostrais.

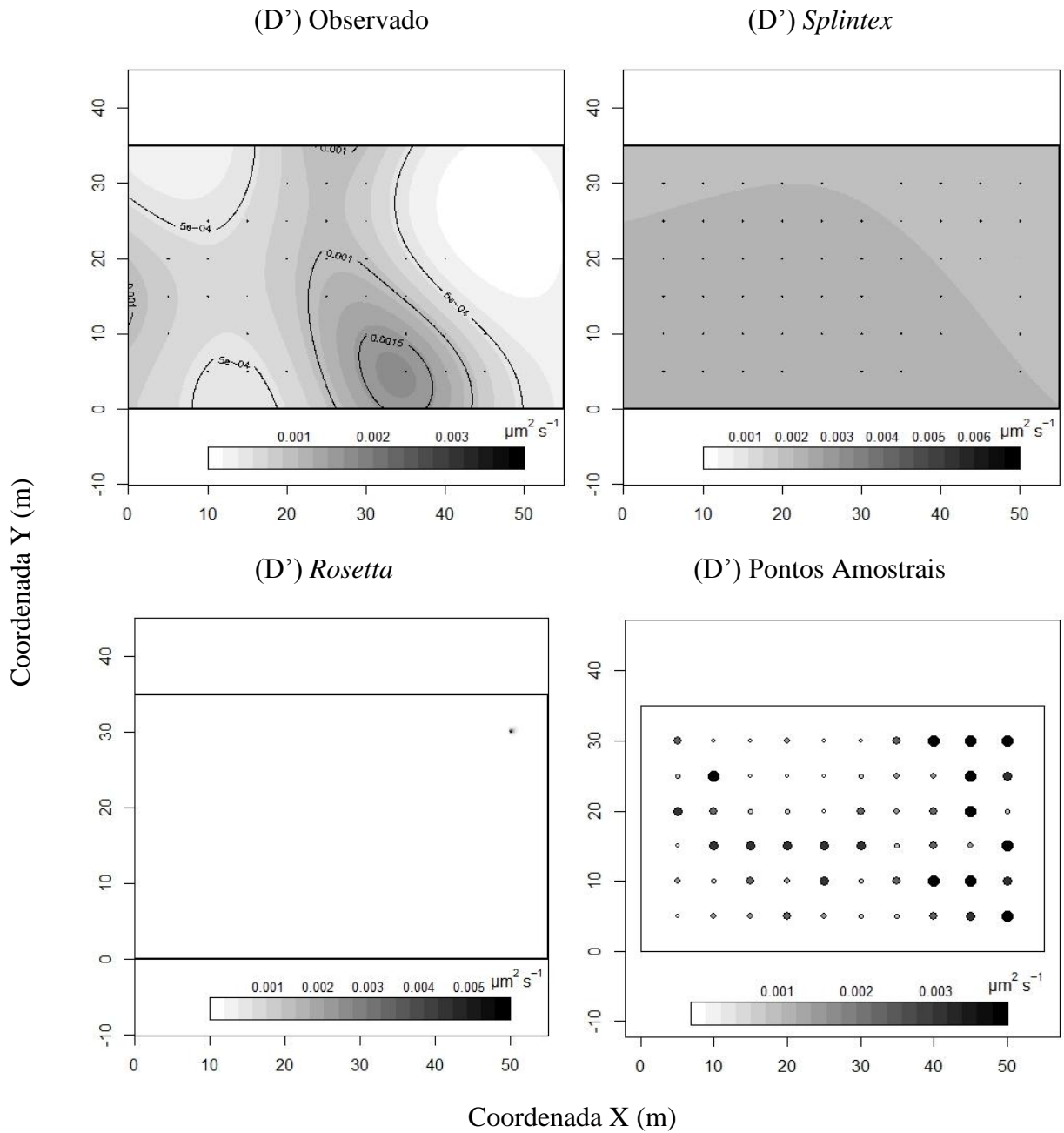


Figura 13. Mapa da variabilidade espacial da difusividade hidráulica (D') observada e simulada por *Splintex* e *Rosetta*, com menor raiz quadrada do erro médio (RMSE) e a distribuição dos valores de D' observado para 60 pontos amostrais.

No entanto, os resultados forneceram informações sobre a precisão do desempenho das FPT's, na simulação da variabilidade espacial das propriedades e funções hidráulicas do solo arenoso, bem como considerações práticas, especialmente a utilização das informações derivadas a partir de uma FPT na modelagem numérica de processos de fluxo de água no solo e de transporte de soluto em grandes escalas.

Para Grego et al. (2005) a existência de dependência espacial das variáveis, bem como a semelhança de comportamento entre elas, sugere que se analise a variabilidade espacial das propriedades do solo em conjunto, antes de adotar um delineamento experimental ao acaso, visto que qualquer tratamento adotado na parcela que necessite da homogeneidade levará a falsos resultados.

4.6. CONCLUSÕES

A utilização das funções de pedotransferência *Splintex* e *Rosetta* na simulação da variabilidade espacial apresentou baixa exatidão, com melhor desempenho do *Splintex*. No entanto, a sua utilização em estudos ambientais necessita de mais informações quanto ao seu desempenho.

Pela amostragem de 5 x 5 m realizada, detectou-se a variabilidade espacial das propriedades hidráulicas (capacidade água disponível, umidades volumétricas na capacidade de campo e no ponto de murchamento permanente) e das funções hidráulicas (capacidade específica, condutividade e difusividade hidráulica do solo), apresentando alcances diferenciados entre as variáveis. Apesar de nenhuma das FPT's mudarem o padrão de distribuição dos dados, ambas resultaram em meios e variações estatisticamente diferentes daqueles observada para todos os valores medidos.

4.7. LITERATURA CITADA

ACUTIS, M. & DONATELLI, M. SOILPAR 2.00, software to estimate soil hydrological parameters and functions. *European Journal of Agronomy*, 18, 373-377, 2003.

ANDRADE, A.R.S.; GUERRINI, I.A.; GARCIA, C.J.B.; KATEZ, I. & GUERRA, H.O.C. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. *Ciência Agrotecnologia*, 29:322-329, 2005.

ANDRADE, R.S. & STONE, L.F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 15:111-116, 2011.

ARYA, L.M. & PARIS, J.F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society American*, 45:1023-1030, 1981.

ARMINDO, R.A. Índices baseados no modelo de van Genuchten como indicadores da qualidade física do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Florianópolis, 2013. Anais. Florianópolis, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2013.

BARROS, A.H.C.; VAN LIER, Q.J.; MAIA, A.H.N. & SCARPARE, F.V. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern Brazil. *Revista Brasileira. Ciência do Solo*, 37:379-391, 2013.

BRITO, A.S. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da permeabilidade ao ar em função dos conteúdos de água e ar no solo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2010. 142p. (Tese de Doutorado).

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B. & NOVAK, J.M. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of American Journal*, 58:1501-1511, 1994.

CAMARGO, E. C.G.; FUCKS, S.D.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V., ed. *Análise espacial de dados geográficos*. 2 ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p.79-122.

DIGGLE, P.J. & RIBEIRO JUNIOR, P. *Model-Based geostatistics*. New York: Springer, 2007. 230p.

GREGO, C. R. & VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29:169-177, 2005.

HAGHVERDI, A.; ÖZTÜRK, H.S. & CORNELIS, W.M. Revisiting the pseudo continuous pedotransfer function concept: Impact of data quality and data mining method. *Geoderma*, 227:31-38, 2014.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D. & STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. *Soil Science*, 114:395-400, 1972.

KAI-HUA, L.; SHAO-HUI, X.; JI-CHUN, W.; SHU-HUA, J. & QING, L. Assessing Soil Water Retention Characteristics and Their Spatial Variability Using Pedotransfer Functions. *Soil Science Society of China*, 21: 413-422, 2011.

KITANIDIS, J.K. *Introduction to geostatistics - Applications in hydrogeology*. New York, Cambridge University Press, 1997. 249p.

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 44:3-7, 1980.

LEIJ, F. J.; ROMANO, N.; PALLADINO, M. & SCHAAP, M. G. & COPPOLA, A. Topographical attributes to predict soil hydraulic properties along a hillslope transect. *Water Resources Research*, 40:1-15, 2004.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12:513-522, 1976.

NEBEL, A.L.C.; TIMM, L.C.; CORNELIS, W.; GABRIELS, D.; REICHARDT, K.; AQUINO, L.S.; PAULETTO, E.A. & REINER, D.J. Pedotransfer functions related to spatial

variability of water retention attributes for lowland soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34:669-680, 2010.

PREVEDELLO, C. L. Novo método para estimativa da umidade do solo na condição de capacidade de campo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 4:23-28, 1999.

PREVEDELLO, C.L. & LOYOLA, J.M.T. Modelo para estimar as propriedades hidráulicas de meios porosos a partir da curva granulométrica. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo, 2002. Anais. São Paulo, ABMS, 2002. p.467-472.

PREVEDELLO & ARMINDO. Física do solo: com problemas resolvidos. 2.ed. rev. e ampl. Curitiba. C. L. Prevedello, 2015. 474p.

PRINGLE, M.J.; ROMANO, N.; MINASNY, B.; CHIRICO, G.B. & LARK, R.M. Spatial evaluation of pedotransfer functions using wavelet analysis. *Journal of Hydrology*, 333:182-198, 2007.

RAMOS, T.B.; HORTA, A.; GONÇALVES, M.C.; MARTINS, J.C. & PEREIRA, L.S. Development of ternary diagrams for estimating water retention properties using geostatistical approaches. *Geoderma*, 230: 229-242, 2014.

RIBEIRO JÚNIOR, P.P. & DIGGLE, P.P. GeoR: A package for geostatistical analysis. *R-News*, 1:15-18, 2001.

RODAS, A. Determinación de la conductividad hidráulica em muestras de suelo inalterada. Lima, CENDRET, 1970, 118p.

ROMANO, N. & SANTINI, A. Effectiveness of using pedo-transfer functions to quantify the spatial variability of soil water retention characteristics. *Journal of Hydrology*, 202:137-157, 1997.

SANTRA, P. & DAS, B.S. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India, *Geoderma*, 146:439-448, 2008.

SEIDEL, E.J. & OLIVEIRA, M.S. novo índice geoestatístico para a mensuração da dependência espacial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38:699-705, 2014.

SOUZA, Z.M.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, G. L. CAMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P. & PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um latossolo vermelho distrófico sob semeadura direta em selvíria (Ms). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25:699-707, 2001.

SCHAAP, M.G. & LEIJ, F.J. Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. *Soil & Tillage Research*, 47:37-42, 1998.

SCHAAP, M.G.; LEIJ, F.J. & VAN GENUCHTEN, M.Th. *Rosetta*: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal Hydrology*, 251:163-176, 2001.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y.; CRESTANA, S. & RAWLS, W.J. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 67:1085-1092, 2003.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S. & UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, Madison, 38:45-94, 1985.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, 44:892-898, 1980.

VAN LIER, Q.J. Disponibilidade de água as plantas. In: LIER, Q.J.V., ed. *Física do solo*. 1 ed. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2010. p.283-298.

VEREECKEN, H.; WEYNANTS, M.; JAVAUX, M.; PACHEPSKY, Y.; SCHAAP, M.G. & VAN GENUCHTEN, M.Th. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: a review. *Vadose Zone Journal* 9:1-26, 2010.

VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um latossolo roxo de Campinas (SP). *Bragantia*, Campinas, 56:181-190, 1997.

CONCLUSÃO GERAL

O desenvolvimento de funções de pedotransferência é uma técnica relativamente nova, com maior evidência para solos com características de clima temperado. Estudos sobre desenvolvimento e avaliação de PFT's para solos tropicais é muito reduzida, restringindo a comparação desse estudo. Limitando-se à maioria entre a estimativa das FPT's para umidades em tensões específicas, como na capacidade de campo e no ponto de murchamento permanente.

A utilização de modelos de pedotransferência Splintex e Rosetta mostrou-se uma forma indireta na simulação das propriedades e funções hidráulicas do solo, auxiliando no desempenho de modelos hidrológicos que necessitam de dados hidráulicos do solo, como entrada para simulação

A utilização de modelos de pedotransferência na simulação das propriedades e funções hidráulicas do solo mostrou-se ser uma forma indireta de determinação precisa e com certa exatidão.

A variabilidade espacial das propriedades e funções hidráulicas do solo obtidas pelas simulações de duas funções de pedotransferência não apresentou o mesmo comportamento aos dados observados.

Neste contexto, estabelece-se que FPT's provenientes de regressões de uma base de dados, com informações de diversos solos, podem levar a graves erros de estimativa devido as

particularidades químicas e climáticas que cada solo esteja submetido. Assim, a necessidade de FPT's que sejam provenientes de modelos fisicamente fundamentados ganham destaque em busca da validade das simulações para quaisquer solos que apresentem diferenças de regiões climáticas e de condições químicas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Recomenda-se realizar a avaliação do desempenho do *Splintex* para outros solos (regiões) do Brasil, uma vez que ele possui fundamentação física, não necessitando, portanto, de calibração.

APÊNDICES

Tabela 1. Descrição das frações granulométricas, densidade das partícula, densidade e porosidade do solo, para os 60 pontos amostrais, solo arenoso.

Número	Frações (%)			ρ_p	ρ_s	α (%)			
Amostras	Areia	Silte	Argila	(kg m ⁻³)	(kg m ⁻³)	Total	Macro	Meso	Micro
1	73,17	5,97	20,86	2693	1549,5	42,1	24,5	22,2	53,3
2	74,24	5,92	19,84	2693	1533,1	42,7	16,0	32,0	52,0
3	74,98	5,68	19,34	2693	1488,8	43,7	19,3	33,4	47,2
4	74,45	5,76	19,79	2693	1577,2	41,1	26,9	18,1	55,0
5	73,56	5,86	20,58	2693	1530,9	42,2	20,9	29,1	50,1
6	74,40	6,31	19,29	2693	1539,0	42,8	26,9	27,7	45,4
7	73,88	5,89	20,23	2693	1592,0	39,7	24,1	21,9	54,0
8	73,58	5,98	20,44	2693	1568,4	44,0	27,1	24,4	48,5
9	73,23	6,53	20,25	2693	1559,0	41,9	23,0	27,2	49,8
10	74,22	6,01	19,78	2693	1499,8	42,6	19,5	30,7	49,7
11	73,42	5,68	20,90	2693	1542,3	42,6	18,7	34,2	47,1
12	74,48	6,10	19,41	2693	1524,9	42,6	21,8	31,9	46,3
13	74,35	5,78	19,87	2693	1544,6	41,1	25,3	17,8	57,0
14	73,74	6,15	20,11	2693	1495,9	41,7	28,5	19,4	52,1
15	76,13	6,00	17,87	2693	1521,4	42,1	26,2	23,1	50,0
16	74,43	5,62	19,95	2693	1513,1	43,0	25,0	29,0	45,9
17	75,24	5,55	19,21	2693	1553,8	42,9	26,5	26,8	46,6
18	74,83	6,13	19,05	2693	1514,9	44,8	24,0	32,6	43,4
19	76,40	6,51	17,09	2693	1510,4	44,0	21,1	26,0	41,2
20	74,47	5,81	19,72	2693	1504,6	43,7	26,5	24,5	49,0
21	74,37	6,14	19,49	2693	1507,9	45,1	27,5	24,9	47,5
22	74,21	5,89	19,90	2693	1485,5	42,6	28,0	21,5	50,4
23	74,67	5,40	19,93	2693	1518,5	44,1	26,9	24,7	48,4
24	74,99	7,78	17,23	2693	1479,6	44,4	22,8	34,1	43,1
25	74,61	6,56	18,83	2693	1466,9	44,8	22,5	34,2	43,3
26	74,23	6,68	19,08	2693	1486,9	45,7	23,4	35,5	41,1
27	73,88	6,96	19,15	2693	1513,3	43,0	20,7	32,8	46,4
28	74,58	5,68	19,74	2693	1535,3	43,5	24,1	16,6	59,4
29	75,14	6,12	18,74	2693	1485,3	45,3	26,6	30,7	42,7
30	74,49	5,98	19,53	2693	1477,2	45,7	20,2	37,4	42,4
31	74,77	6,13	19,10	2693	1452,1	47,1	32,4	19,9	47,7
32	74,04	6,62	19,34	2693	1462,1	46,2	26,9	30,4	42,8
33	73,24	6,33	20,43	2693	1476,1	44,5	22,1	33,0	44,9
34	75,12	6,06	18,83	2693	1534,7	43,9	23,4	34,7	42,0
35	74,74	5,80	19,46	2693	1527,1	44,9	27,9	30,0	42,1
36	73,73	6,74	19,53	2693	1502,6	44,8	23,7	34,7	41,5
37	73,68	6,63	19,69	2693	1503,7	45,5	23,5	31,0	45,6
38	75,72	5,65	18,63	2693	1468,7	47,8	25,1	36,4	38,4
39	74,47	6,11	19,42	2693	1480,4	43,5	24,5	29,8	45,7
40	74,48	6,21	19,30	2693	1530,5	44,6	22,2	34,9	42,8
41	74,03	5,86	20,11	2693	1494,0	44,2	26,3	27,0	46,6
42	74,25	6,06	19,68	2693	1518,1	44,7	25,5	26,8	47,7
43	73,83	6,94	19,23	2693	1458,0	44,0	20,4	32,9	46,7
44	74,02	6,96	19,02	2693	1476,0	45,5	21,7	32,8	45,5
45	74,16	6,51	19,33	2693	1479,1	44,3	25,2	25,8	49,0
46	74,60	5,88	19,52	2693	1525,3	43,9	22,6	31,0	46,4
47	75,41	5,43	19,15	2693	1518,2	43,1	22,2	30,0	47,8
48	74,74	5,38	19,88	2693	1505,7	45,4	23,6	32,8	43,7
49	74,40	5,78	19,82	2693	1476,1	43,1	19,9	30,2	49,8

Número	Frações (%)			ρ_p	ρ_s	α (%)			
Amostras	Areia	Silte	Argila	(kg m ⁻³)	(kg m ⁻³)	Total	Macro	Meso	Micro
50	74,54	5,51	19,95	2693	1536,3	42,8	24,1	23,7	52,1
51	72,78	6,39	20,83	2693	1513,6	43,6	20,9	31,4	47,7
52	74,02	6,67	19,32	2693	1528,6	43,6	24,4	24,7	50,9
53	74,90	5,59	19,51	2693	1487,9	43,4	19,5	30,6	49,9
54	76,55	5,96	17,49	2693	1499,0	45,4	25,2	30,9	43,9
55	74,28	5,62	20,10	2693	1520,1	42,2	24,9	23,5	51,6
56	73,06	6,08	20,86	2693	1480,0	44,4	25,3	27,0	47,7
57	74,22	5,97	19,81	2693	1524,7	41,9	23,9	21,7	54,4
58	74,67	5,93	19,40	2693	1473,8	45,0	21,5	33,4	45,2
59	74,35	6,79	18,86	2693	1493,4	43,1	20,6	29,3	50,1
60	74,47	6,22	19,31	2693	1471,4	44,3	24,9	28,8	46,3

Tabela 2. Descrição das frações granulométricas, densidade das partículas, densidade e porosidade do solo, para os 43 pontos amostrais, solo argiloso.

Amostras	Frações (%)			ρ_p	ρ_s	α (%)
	Areia	Silte	Argila	(Kg m ⁻³)	(Kg m ⁻³)	Total
1	27,20	16,90	55,90	2650	1092,0	51,63
2	33,10	13,50	53,40	2650	1207,0	47,97
3	20,72	13,52	65,75	2620	1390,0	46,64
4	21,66	8,92	69,43	2820	1200,0	57,39
5	16,36	8,34	75,29	2660	1110,0	58,34
6	21,74	8,00	70,25	2840	1090,0	61,82
7	12,00	13,00	75,00	2950	1040,0	64,10
8	12,00	13,00	75,00	2950	1050,0	61,05
9	12,00	13,00	75,00	2950	1160,0	63,27
10	29,60	12,50	57,90	2610	1410,0	50,00
11	38,30	10,90	50,80	2590	1250,0	59,00
12	36,00	11,40	52,60	2600	960,0	59,00
13	35,20	13,80	51,10	2660	1220,0	54,00
14	3,93	27,76	68,31	2590	1130,0	56,37
15	6,45	25,53	68,02	2620	1290,0	50,76
16	4,43	37,73	57,85	2700	1380,0	48,89
17	32,00	10,00	58,00	2588	1364,0	47,30
18	33,00	10,00	57,00	2589	1359,0	47,50
19	31,00	14,00	55,00	2588	1395,0	46,10
20	33,10	17,70	49,10	2600	1400,0	43,00
21	38,30	19,90	41,70	2500	1400,0	42,00
22	35,90	16,10	48,00	2600	1500,0	38,00
23	32,10	15,40	52,60	2500	1400,0	43,00
24	32,70	19,80	47,50	2500	1400,0	39,00
25	34,10	15,10	50,80	2500	1400,0	45,00
26	35,10	16,80	48,20	2600	1500,0	40,00
27	41,10	18,10	40,80	2600	1400,0	41,00
28	43,10	9,20	47,70	2600	1400,0	41,00
29	37,60	20,70	41,70	2600	1400,0	44,00
30	39,40	17,50	43,20	2600	1400,0	40,00
31	29,70	22,30	48,10	2500	1400,0	43,00
32	33,60	16,50	49,90	2600	1400,0	44,00
33	32,20	12,70	55,10	2600	1500,0	45,00
34	35,90	14,60	49,50	2600	1500,0	41,00
35	14,30	29,87	55,67	2650	1350,0	52,00
36	14,30	29,87	55,67	2650	1230,0	56,00
37	14,30	29,87	55,67	2650	1100,0	59,00
38	14,30	29,87	55,67	2650	1320,0	55,00

Amostras	Frações (%)			ρ_p (Kg m ⁻³)	ρ_s (Kg m ⁻³)	α (%) Total
	Areia	Silte	Argila			
39	14,30	29,87	55,67	2650	1270,0	56,00
40	14,30	29,87	55,67	2650	1160,0	59,00
41	14,30	29,87	55,67	2650	1300,0	54,00
42	14,30	29,87	55,67	2650	1290,0	50,00
43	14,30	29,87	55,67	2650	1170,0	57,00

Tabela 3. Descrição dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980), para predição da curva de retenção de água no solo, para os 43 pontos amostrais, solo argiloso.

Número Amostras	Parâmetros da Curva					r	RMSE (m ³ m ⁻³)
	θ_s	θ_r	λ (hPa ⁻¹)	n	m		
1	0,5163	0,2474	0,0382	1,3690	0,2695	-	-
2	0,4797	0,1861	0,0311	1,2847	0,2216	-	-
3	0,4664	0,2283	0,0169	1,3768	0,2737	-	-
4	0,5739	0,2056	0,0456	1,4358	0,3035	-	-
5	0,5834	0,2145	0,0640	1,3905	0,2808	-	-
6	0,6182	0,2028	0,0608	1,4344	0,3028	-	-
7	0,6410	0,2950	0,1000	1,2352	0,1904	-	-
8	0,6105	0,2700	0,0910	1,3534	0,2611	-	-
9	0,6327	0,2897	0,0235	1,4408	0,3059	-	-
10	0,5000	0,2100	0,2200	1,2100	0,1736	-	-
11	0,5900	0,2800	0,1515	1,6632	0,3987	-	-
12	0,5900	0,2800	0,1515	1,6632	0,3987	-	-
13	0,5400	0,3200	0,1248	1,4581	0,3142	-	-
14	0,5637	0,2589	0,0445	1,4714	0,3204	0,9907	0,0155
15	0,5076	0,2900	0,0297	1,3351	0,2510	0,9876	0,0113
16	0,4889	0,2447	0,0416	1,2926	0,2264	0,9958	0,0072
17	0,4730	0,1886	0,1804	1,3096	0,2364	0,9994	0,0028
18	0,4750	0,1975	0,1535	1,3144	0,2392	0,9989	0,0036
19	0,4610	0,2289	0,0593	1,4828	0,3256	0,9976	0,0050
20	0,4300	0,2290	0,0754	1,2449	0,1967	0,9445	0,0202
21	0,4200	0,2100	0,0635	1,2180	0,1790	0,9247	0,0235
22	0,3800	0,2190	0,0296	1,2524	0,2015	0,9426	0,0161
23	0,4300	0,2090	0,0143	1,2965	0,2287	0,9176	0,0282
24	0,3900	0,1200	0,0060	1,2000	0,1667	0,9644	0,0249
25	0,4500	0,2200	0,0464	1,2086	0,1726	0,9275	0,0243
26	0,4000	0,2300	0,0470	1,2177	0,1788	0,9277	0,0175
27	0,4100	0,1790	0,0214	1,2838	0,2211	0,9385	0,0254
28	0,4100	0,1890	0,0208	1,3154	0,2398	0,9604	0,0201
29	0,4400	0,2103	0,0010	2,0491	0,5120	0,9636	0,0341
30	0,4000	0,2070	0,0230	1,2556	0,2036	0,9378	0,0218
31	0,4300	0,2160	0,0448	1,2236	0,1827	0,9209	0,0261
32	0,4400	0,1890	0,0621	1,3588	0,2641	0,9800	0,0160
33	0,4500	0,2340	0,0934	1,2115	0,1746	0,9399	0,0227
34	0,4100	0,3140	0,0630	1,2604	0,2066	0,9884	0,0043
35	0,5200	0,2600	0,0971	1,2658	0,2100	-	-
36	0,5600	0,2600	0,0547	1,3303	0,2483	-	-
37	0,5900	0,2000	0,1504	1,2573	0,2046	-	-
38	0,5500	0,2800	0,0596	1,3584	0,2638	-	-
39	0,5600	0,2600	0,0401	1,3787	0,2747	-	-
40	0,5900	0,2200	0,0199	1,2696	0,2124	-	-
41	0,5400	0,2800	0,0362	1,3989	0,2852	-	-
42	0,5000	0,2700	0,0996	1,2969	0,2289	-	-
43	0,5700	0,2100	0,0947	1,2791	0,2182	-	-